

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Aplicação de modelação oceânica ao estudo de dispersão de plásticos na zona da Margem Ibérica Ocidental

Mariana Ré Carvalho Henriques

Mestrado em Ciências Geofísicas
Especialização em Meteorologia e Oceanografia

Dissertação orientada por:
Professor Doutor Álvaro Peliz (FCUL)
Professora Doutora Paula Sobral (FCT-NOVA)

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Álvaro Peliz e Professora Doutora Paula Sobral, pelo empenho e disponibilidade demonstrada na orientação deste trabalho, bem como na revisão deste texto.

O meu especial agradecimento à Doutora Ana Teles-Machado pelo apoio prestado na configuração e execução dos programas e na disponibilização dos dados.

Quero agradecer aos meus amigos e colegas pelo apoio e incentivo que prestaram durante a realização deste estudo.

Por último, quero agradecer aos meus pais e à minha irmã pelo apoio incondicional e força que prestaram ao longo deste percurso.

Resumo

A poluição associada a plásticos marinhos é considerada um dos problemas ambientais mais graves à escala global, sendo hoje um tema de maior relevância na agenda internacional. A caracterização dos plásticos tem sido objeto de diversos estudos, mas a componente de monitorização dos padrões de dispersão é praticamente inexistente na região da Península Ibérica. O objetivo deste estudo foi conjugar técnicas de modelação para um primeiro estudo da concentração/dispersão de plásticos à escala da zona da Margem Continental Portuguesa. Neste contexto, foi utilizado um modelo lagrangiano (LTRANS) sobre resultados de um modelo oceânico (ROMS) para demonstrar quais os locais de acumulação/dispersão das partículas no final dos seus percursos, e se estes são influenciados pelos períodos em análise.

Foram simuladas trajetórias de partículas lançadas inicialmente nas zonas do Tejo e do Sado, isto é, os percursos de cada partícula durante seis períodos bimensais ao longo de um ano (1991). Em cada zona foram lançados dois conjuntos de 400 partículas em dois pontos distintos, com intervalos de 30 a 30 minutos. As zonas escolhidas para este estudo tiveram por base zonas de rotas de navios e pontos prováveis de descarga. As trajetórias obtidas foram analisadas com vista a avaliar o seu comportamento, nomeadamente a sua dispersão e pontos de acumulação, bem como a evidência de algum sinal sazonal.

As conclusões sugerem que existe algum sinal sazonal, ou seja, no final da primavera e no verão as partículas tendem a ficar mais longe da costa, enquanto que no final do outono e no inverno as partículas tendem a ficar acumuladas perto do ponto de origem. Os resultados apresentados mostram que muitas partículas que partem da zona do Sado podem chegar à costa Vicentina, e possivelmente podem contribuir para as concentrações de microplásticos encontradas nessa região. Por outro lado, estes resultados confirmam que geralmente no inverno/outono existe uma maior concentração de MP e que as partículas ficam acumuladas perto da costa, principalmente no inverno.

Palavras-chave: poluição, lixo marinho, microplásticos, Costa Ibérica, modelo oceânico, modelo Lagrangiano, Trajetórias de partículas, correntes marinhas.

Abstract

Marine pollution related with plastics is considered one of the most serious environmental problems on a global scale, being a topic of greater relevance on the international agenda. The characterization of plastics has been the subject of several studies, but the component of monitoring of dispersion patterns is practically non-existent in the Iberian Peninsula region. The objective of this study was to combine modelling techniques for a first study of the concentration/dispersion of plastics at the scale of the Portuguese Continental Margin area. In this way, a Lagrangian model (LTRANS) was used with oceanic model (ROMS) results to show the locations where particle accumulation/dispersion occurs at the end of their paths, and whether they are influenced by the periods under analysis.

Trajectories of particles initially released in the Tejo and Sado zones were simulated, i.e., the path of each particle during six bimonthly periods over a year (1991). In each zone, two sets of 400 particles were released at two different points, with intervals of 30 to 30 minutes. The areas chosen for this study were based on vessels route zones and likely discharge points. The trajectories obtained were analyzed to evaluate their behavior, namely their dispersion and accumulation points, as well as the evidence of some seasonal sign.

The conclusions suggest a seasonal sign, i.e. in late spring and summer particles tend to stay further away from the coast, while in late autumn and winter particles tend to accumulate near the source point or origin. Results show that many particles that released from the Sado area can reach the Costa Vicentina, and possibly may contribute to the concentrations of microplastics found in this region. On the other hand, these results confirm that usually in winter/autumn there is a higher concentration of microplastics and that particles accumulate near the coast, especially in winter.

Key words: pollution, marine waste, microplastics, Iberian Coast, ocean model, Lagrangian model, Particles trajectories, marine currents.

Índice

Lista de quadros.....	VI
Lista de Figuras.....	VI
1 Introdução.....	1
2 Lixo marinho – Plástico	1
2.1 Fontes de lixo marinho, degradação do plástico.....	2
2.2 Reservatórios de lixo marinho.....	2
2.2.1 Distribuição Espacial	2
2.2.2 Distribuição Vertical	3
2.3 Tipos de plástico encontrados nos mares e os impactos do lixo marinho no meio ambiente	3
2.4 Poluição Marinha na costa ocidental da Península Ibérica	4
3 Circulação Oceânica Costeira	5
4 Metodologia.....	9
4.1 Métodos Eulerianos e Lagrangianos para o cálculo das trajetórias	9
4.2 Modelo Numérico (ROMS).....	10
4.2.1 Equações do movimento.....	11
4.3 Modelo Lagrangiano L-TRANS.....	12
4.3.1 Estrutura do Modelo	13
4.3.2 Esquema de Interpolação.....	13
4.3.3 Condições Fronteira	14
4.3.4 Inicialização	15
4.3.5 Ficheiros de entrada	16
5 Resultados e análise.....	17
5.1 Simulações e análises.....	18
5.1.1 Trajетórias das partículas nas zonas do Tejo e do Sado	18
5.1.2 Distribuição dos pontos das trajetórias por latitude	28
5.1.3 Distância de dispersão/acumulação nas zonas do Tejo e do Sado.....	31
6 Conclusões.....	37
7 Referências	39

Lista de quadros

<i>Tabela 5.1. Média da distribuição dos pontos das trajetórias por latitude na zona do Tejo para todos os meses nos dois conjuntos de partículas que inicializaram: (a) no ponto 1; (b) no ponto 2.</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 5.2. Média da distribuição dos pontos das trajetórias por latitude na zona do Sado para todos os meses nos dois conjuntos de partículas que inicializaram: (a) no ponto 1; (b) no ponto 2.</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 5.3. Distância Média de dispersão/acumulação das trajetórias das partículas em quilómetro (km) na zona do Tejo, em cada período para cada ponto de lançamento. A coluna da Média das médias representa a distância média entre a média do ponto 1 a do ponto 2. Desvio-Padrão da dispersão/acumulação das distâncias das trajetórias das partículas na zona do Tejo.</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 5.4. Distância Média de dispersão/acumulação das trajetórias das partículas em quilómetro (km) na zona do Sado, em cada período para cada ponto de lançamento. A coluna da Média das médias representa a distância média entre a média do ponto 1 a do ponto 2. Desvio-Padrão da dispersão/acumulação das distâncias das trajetórias das partículas na zona do Sado.....</i>	<i>36</i>

Lista de Figuras

<i>Figura 3.1. Esquema das velocidades na camada de Ekman (Hemisfério Norte). Velocidade da água em função da profundidade (projeção superior). A seta vermelha mais larga representa a direção do total transporte de Ekman, que é perpendicular ao vento(Talley et al., 2011, p.198).</i>	<i>6</i>
<i>Figura 3.2. Esquema do sistema de circulação superficial no Oceano Atlântico Norte (Talley et al., 2011, p.246).</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3.3. Sistema de correntes do bordo leste do Atlântico Norte. Estão identificadas a Corrente de Deriva do Atlântico Norte (North Atlantic Drift Current - NADC), a Corrente do Atlântico Norte (North Atlantic Current - NAC), a Corrente de Portugal (Portugal Current - PoC), a corrente dos Açores (Azores Current - AC), a Corrente das Canárias (Canary Current - CaC), a Corrente Equatorial do Norte (North Equatorial Current - NEC), e a Contra Corrente Equatorial do Norte (North Equatorial Counter-Current - NECC). Estão também identificadas as massas de água central: Água Central Oriental do Atlântico Norte de origem sub-polar (Eastern North Atlantic Central Water of sub-polar origin - ENACWP), a Água Central Oriental do Atlântico Norte de origem sub-tropical (Eastern North Atlantic Central Water of sub-tropical origin - ENACWT) e a Água Central do Atlântico Sul (South Atlantic Central Water - SACW) (de Mason et al., 2005).(Hurduc, 2018).</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4.1. Diagrama do modelo LTRANS (Schlag & North, 2012).</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4.2. Exemplo de mensagem de erro de execução do modelo LTRANS.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5.1. Representação dos pontos de lançamento das partículas para as zonas do Tejo e do Sado. As partículas foram lançadas nos pontos 1 (laranjas) e nos pontos 2 (amarelos).</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5.2. (a): Representação dos polígonos para as zonas do Tejo (tracejado azul) e do Sado (tracejado preto); (b): Linha de contorno do modelo LTRANS da costa oeste de Portugal.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5.3. Trajetórias das partículas: (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado nos meses de janeiro e fevereiro (JF). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5.4. Trajetórias das partículas: (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado nos meses de março e abril (MA). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5.5. Trajetórias das partículas: (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado nos meses de maio e junho (MJ). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5.6. Trajetórias das partículas: (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado nos meses de julho e agosto (JA). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5.7. Trajetórias das partículas: (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado nos meses de setembro e outubro (SO). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.</i>	<i>21</i>

Figura 5.8. Trajetórias das partículas: (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado nos meses de novembro e dezembro (ND). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.	22
Figura 5.9. Trajetórias das partículas na zona do Tejo e na zona do Sado: (a) nos meses de verão JA; (b) na passagem de verão para outono SO. As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.	23
Figura 5.10. Trajetórias das partículas na zona do Tejo e na zona do Sado: (a) na passagem de inverno para primavera MA; (b) na passagem de primavera e verão MJ. As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.	24
Figura 5.11. Trajetórias das partículas na zona do Tejo e na zona do Sado: (a) no inverno JF; (b) na passagem outono/inverno ND. As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.	25
Figura 5.12. Limite das NUTS 2013. Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de acordo com os critérios geográficos (NUTS III). (site: http://portugalglobal.pt/PT/InvestirPortugal/RegioesMultifacetadas/Paginas/RegioesMultifacetadas.aspx).	25
Figura 5.13. Representação das trajetórias das partículas nos meses de verão em JA: (a) zona do Tejo e (b) zona do Sado; na passagem de verão para outono em SO: (c) zona do Tejo e (d) zona do Sado, para o estudo das zonas de passagem das partículas durante os respetivos períodos.	26
Figura 5.14. Representação das trajetórias das partículas nos meses de verão em MA: (a) zona do Tejo e (b) zona do Sado; na passagem de verão para outono em MJ: (c) zona do Tejo e (d) zona do Sado, para o estudo das zonas de passagem das partículas durante os respetivos períodos.	26
Figura 5.15. Representação das trajetórias das partículas nos meses de verão em JF: (a) zona do Tejo e (b) zona do Sado; na passagem de verão para outono em ND: (c) zona do Tejo e (d) zona do Sado, para o estudo das zonas de passagem das partículas durante os respetivos períodos.	27
Figura 5.16. Distribuição dos pontos das trajetórias por latitude na zona do Tejo em todos os meses: (a) no ponto 1; (b) no ponto 2. Representação das trajetórias das partículas na zona do Tejo em todos os meses nos pontos 1 e 2.	29
Figura 5.17. Distribuição dos pontos das trajetórias por latitude na zona do Sado em todos os meses: (a) no ponto 1; (b) no ponto 2. Representação das trajetórias das partículas na zona do Tejo em todos os meses nos pontos 1 e 2.	30
Figura 5.18. Representação das posições finais de cada partícula em janeiro e fevereiro (JF): (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. (c) : Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para JF.	32
Figura 5.19. Representação das posições finais de cada partícula em março e abril (MA): (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. (c) : Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para MA.	32
Figura 5.20. Representação das posições finais de cada partícula em maio e junho (MJ): (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. (c) : Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para MJ.	33
Figura 5.21. Representação das posições finais de cada partícula em julho e agosto (JA): (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. (c) : Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para JA.	33
Figura 5.22. Representação das posições finais de cada partícula em setembro e outubro (SO): (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. (c) : Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para SO.	34
Figura 5.23. Representação das posições finais de cada partícula em novembro e dezembro (ND): (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. (c) : Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para ND.	34

Lista de abreviaturas e símbolos

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CSV	Comma Separated Values
FMD	Floating Marine Debris
INE	Instituto Nacional de Estatística
LTRANS	Larval TRANSport Lagrangian model
MP	Microplásticos
NAC	North Atlantic Current (Corrente do Atlântico Norte)
NETCDF	NETwork Common Data Form
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PI	Península Ibérica
PIP	Point-In-Polygon
ROMS	Regional Ocean Modeling System
WWF	World Wildlife Fund
ROMS	Regional Ocean Modeling System
ROMS-AGRIF	Regional Ocean Model System Adaptive Mesh Refinement In Fortran
JF	janeiro e fevereiro
MA	março e abril
MJ	maio e junho
JA	julho e agosto
SO	setembro e outubro
ND	novembro e dezembro
x, y	coordenadas horizontais
z	coordenada vertical
g	aceleração da gravidade
t	tempo
u, v, w	componentes x, y, z do vetor de velocidade \vec{v}
P	pressão total, $P \approx -\rho_0 g z$
$f(x, y)$	parâmetro de Coriolis
$h(x, y)$	profundidade de fundo
ν, ν_θ	viscosidade e a difusividade molecular
D_u, D_v, D_c	termos de difusividade, segundo x, y e z respetivamente
F_u, F_v, F_c	termos de forçamento, segundo x, y e z respetivamente
K_m, K_c	viscosidade e difusividade vertical do eddy
$\phi(x, y, z, t)$	pressão dinâmica $\phi = P/\rho_0$
$\rho_0 + \rho(x, y, z, t)$	densidade total <i>in situ</i>
$S(x, y, z, t)$	salinidade
$T(x, y, z, t)$	temperatura potencial
$\zeta(x, y, t)$	elevação da superfície

1 Introdução

A população global gera quantidades consideráveis de desperdício que estão a aumentar continuamente (Koi et al., 2017). Os resíduos de plástico que entram nos oceanos foram estimados entre 4,8 e 12,7 milhões de toneladas em 2010, e espera-se que esses valores aumentem uma ordem de magnitude até 2025 (Koi et al., 2017).

A poluição associada a plásticos marinhos é considerada um dos problemas ambientais mais graves à escala global, sendo hoje um tema de maior relevância na agenda internacional. A caracterização dos plásticos tem sido objeto de diversos estudos, mas a componente de monitorização dos padrões de dispersão é praticamente inexistente na região da Península Ibérica.

Neste estudo são analisadas simulações de trajetórias de partículas lançadas à superfície do mar em duas zonas, no Tejo e no Sado, durante seis períodos bimensais ao longo de um ano (1991), com vista a avaliar o seu comportamento, nomeadamente a sua dispersão e eventuais pontos de acumulação, bem como a evidência de algum sinal sazonal.

Os objetivos deste trabalho são:

1. conjugar técnicas de modelação para um primeiro estudo da concentração/dispersão de plásticos à escala da zona da Margem Continental Portuguesa;
2. utilizar uma abordagem exploratória de dispersão de fontes determinadas baseadas em hipóteses iniciais (rotas de navios ou pontos prováveis de descargas), com fontes distribuídas, assumindo uma proveniência de larga escala não conhecida (modelos globais);
3. utilizar modelos lagrangianos sobre resultados de modelos oceânicos para o estudo de dispersão;
4. comparar padrões de concentração e dispersão com estruturas oceânicas indutoras de concentração à superfície (tipicamente as regiões frontais).

2 Lixo marinho – Plástico

Os resíduos de plástico estão a poluir cada vez mais os mares, e de acordo com uma estimativa, até 2050 os oceanos poderão conter, em massa, mais plástico que peixe. Estudos calcularam que 275 milhões de toneladas tiveram origem nas costas de 192 países em 2010, e estimaram que 4,8 a 12,7 milhões de toneladas entram no oceano por ano (Jambeck et al., 2015).

Várias publicações científicas que reportavam um grande número de resinas de plásticos no Atlântico Norte no início dos anos 1970 estimularam o interesse pela investigação dos resíduos de plástico no mar, através de publicações mais recentes que relataram plásticos no fundo do mar e no impacto dos plásticos na vida marinha (Ryan, 2015).

Um dos desafios atuais mais importantes é a necessidade de desenvolver técnicas para rastrear as menores partículas de plástico através dos ecossistemas marinhos. Também precisamos de ter uma melhor compreensão da dinâmica de distribuição dos resíduos de plásticos, se quisermos verificar a eficácia das medidas de mitigação (Ryan, 2015).

2.1 Fontes de lixo marinho, degradação do plástico

As fontes de lixo marinho podem-se classificar em terrestres ou com base no oceano, dependendo de onde o resíduo entrou no mar. As fontes terrestres incluem principalmente o uso da costa, lixo urbano, zonas industrializadas, portos e aterros desprotegidos localizados perto da costa, resíduos de esgotos, pesca e eventos extremos (por exemplo, tempestades) (Martins & Sobral, 2011; Kukulka et al., 2012; Galgani et al., 2015; Cózar et al., 2015). Este resíduo pode ser transportado para o mar através dos rios, descargas industriais, escoamentos superficiais (runoffs) e pelo vento. Enquanto às fontes de lixo marinho com base no oceano estão incluídas o transporte marítimo comercial, navios, embarcações de pesca comercial e recreativa, frotas militares e de pesquisa, embarcações de recreio e instalações offshore, como plataformas e locais de aquacultura (Galgani et al., 2015; Cózar et al., 2015; Sá et al., 2016).

O plástico quando se encontra na água do mar degrada-se lentamente devido a diversas transformações, tais como, a exposição à radiação UV, pela degradação química, pelas correntes oceânicas, pelo vento e pela própria vida marinha. O plástico quando fragmentado é caracterizado consoante o seu tamanho: partículas menores que 5 mm de diâmetro são denominadas de microplásticos (MP) (Van Sebille et al., 2015; Koi et al., 2017). Devido à fragmentação do plástico com maior dimensão, espera-se que o número de partículas no oceano aumente exponencialmente com a diminuição do tamanho das partículas (Koi et al., 2017).

2.2 Reservatórios de lixo marinho

Os plásticos não permanecem na superfície do mar o tempo todo. Estes podem ser misturados temporariamente até várias dezenas ou mesmo centenas de metros de profundidade (Kukulka et al., 2012 e Poulain et al., 2019), devido à rebentação das ondas e à turbulência oceânica, podendo regressar à superfície. Esta tendência de subir até à superfície depende da velocidade máxima de subida da partícula (que, por sua vez, também é controlada pela forma e dimensão), bem como da diferença de densidades entre o plástico e a água do mar (Allen, 1985 e Chubarenko et al., 2016). (Van Sebille et al., 2020)

O lixo marinho pode ser encontrado flutuando na superfície do oceano, na coluna de água, encalhado nas costas/praias ou depositado no mar, nas áreas polares e sistemas de água doce, e até no fundo do mar (Galgani et al., 2015; Antunes et al., 2018; Sá et al., 2016).

2.2.1 Distribuição Espacial

Os detritos de plástico marinho foram identificados como poluentes no oceano aberto desde os anos 70 no Atlântico Norte e no Pacífico Norte, especialmente no Pacífico no final dos anos 90 (1997), mas só recentemente o estudo espacial e temporal da poluição plástica à superfície do oceano aberto foi aprofundado (Kukulka et al., 2012). Sabe-se que a maior concentração de microplásticos encontra-se nos centros dos giros subtropicais do Atlântico Norte e do Pacífico Norte e que a menor concentração se encontra nos trópicos. Estudos demonstraram zonas de maior concentração de microplásticos no Mediterrâneo e no Pacífico Norte, denominadas de zonas de acumulação de Detritos Marinhos Flutuantes (Floating Marine Debris - FMD) e que recentemente ganharam uma atenção mundial (Galgani et al., 2015).

2.2.2 Distribuição Vertical

Os detritos de plástico marinho mais abundantes na superfície do oceano são as partículas de plástico com dimensões abaixo dos 5 mm (MP), e têm uma densidade média de 965 kg/m^3 que é menor que a densidade da água do mar à superfície (1027 kg/m^3) e que a densidade de água do mar ao longo da vertical. Da mesma maneira que uma partícula passiva, esses detritos de plástico estão sujeitos à física da mistura dentro da camada limite da superfície do oceano. Uma hipótese é que o fluxo ascendente de detritos de plástico flutuante é compensado por um fluxo descendente turbulento para condições de vento moderado, resultando em detritos de plástico distribuídos verticalmente ao longo da camada de mistura influenciada pelo vento (“wind-mixing”) (Kukulka et al., 2012).

Para compreender melhor o transporte vertical de plásticos flutuantes é fundamental melhorar as estimativas da concentração, da distribuição de tamanho e da dispersão de plásticos nos oceanos do mundo (Reisser et al., 2015).

A mistura vertical é induzida por vários processos que atuam em diferentes escalas temporais e espaciais, tais como, bombeamento de larga escala (Ekman), afloramento (upwelling) e convergência (downwelling), frentes, e estruturas em rolos induzidas por turbulência, como células de convecção e circulação de Langmuir. Também pode haver mistura vertical em estuários e foz dos rios, mas na presença de fortes estratificações e movimentos de marés, a mistura vertical de plásticos nesses locais é muito mais complexa. (Van Sebille et al., 2020)

A mistura vertical de plásticos flutuantes, afeta os padrões de deriva horizontal e os impactos ecológicos da poluição por plástico (Reisser et al., 2015). O aumento do nível do mar pode afetar os padrões de transporte costeiro e libertar grandes quantidades de plástico presos em sedimentos costeiros ou áreas urbanas inundadas intermitentemente (Van Sebille et al., 2020). Além disso, a distribuição vertical de plásticos influenciará a probabilidade de animais que habitam em diferentes profundidades encontrarem e potencialmente interagirem com esses plásticos (Reisser et al., 2015).

As amostras nas camadas subsuperficiais são ainda escassas e os processos que influenciam a distribuição de plásticos por toda a coluna de água do oceano são pouco compreendidos. São necessárias amostragens de vários níveis numa vasta gama de estados do mar para quantificar melhor a mistura vertical dos detritos de plásticos. Estas deverão melhorar as previsões dos níveis de concentração de plástico no oceano (Reisser et al., 2015).

2.3 Tipos de plástico encontrados nos mares e os impactos do lixo marinho no meio ambiente

O plástico encontrado nos oceanos pode ser dividido em dois tipos: em plásticos descartáveis e em equipamentos de pesca. Segundo a Comissão Europeia, os plásticos descartáveis representam 49% do resíduo encontrado no mar, os resíduos de plástico dos equipamentos de pesca representam 27%, outros plásticos representam 6% e 18% são resíduos que são não plásticos. (ANP e WWF, 2019)

Segundo o relatório de 2017 da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) o TOP 20 do lixo marinho 2017 constata-se que 75% deste é constituído por plásticos, verificando-se embora com algumas diferenças que, os itens mais abundantes nas praias portuguesas monitorizadas são semelhantes aos identificados nas praias monitorizadas nas diferentes regiões da Europa. Esses itens consistem principalmente em fragmentos de plástico/poliestireno, beatas de cigarros, cápsulas/argolas de plástico das tampas, corda e cordel, paus de cotonetes, sacos de batatas fritas/guloseimas e paus chupa-chupa,

garrafas/contentores de bebida, embalagens de alimentos e comida, balões, talheres/tabuleiros de plástico e sacos de plástico (APA, 2017). Este resíduo provém principalmente de atividades recreativas da costa, mas também aquele que é transportado pelo vento e pelo mar através das correntes marítimas. As densidades de lixo marinho nas praias podem ser aumentadas em até 40% no verão devido ao aumento de número de turistas (Galgani et al., 2015).

Um dos maiores impactos do resíduo encontrado no mar é na fauna marinha, porque estão relacionados com o emaranhamento em artes de pesca perdidas ou abandonadas e a ingestão que em particular afetam as aves, tartarugas e mamíferos marinhos. A ingestão deste plástico pelos animais marinhos causa bloqueios físicos no sistema digestivo e reduz a absorção de nutrientes, levando à fome, lesões digestivas e à morte (Sá et al., 2016). Outros problemas causados pelos resíduos de plástico na vida marinha são a degradação do habitat e a exposição a produtos químicos compostos por plásticos (Hammer et al., 2012).

Na saúde humana, os resíduos de plástico podem causar problemas como a assimilação de produtos químicos através da cadeia alimentar, embora não existam ainda evidências de uma causa-efeito directa. À medida que o plástico se decompõe no mar, liberta gases com efeito de estufa que contribuem para o aquecimento global. Sabe-se que a reciclagem dum milhão de toneladas de plástico equivale a retirar um milhão de carros da estrada, em termos de emissões de CO₂ (STAP, 2018).

2.4 Poluição Marinha na costa ocidental da Península Ibérica

Em Portugal, as águas continentais, águas superficiais interiores (rios e albufeiras) e águas subterrâneas, fazem parte dos principais corredores que ligam o Mediterrâneo, o Norte da Europa e o Atlântico Oriental. De acordo os dados do INE (2012), a pesca é uma atividade muito significativa na economia do país, com uma frota com mais de 4800 embarcações e mais de 20,000 licenças de pesca emitidas anualmente, sendo que os navios representam potencialmente uma importante fonte de detritos. (Sá et al., 2016).

A costa de Portugal é vulnerável à acumulação em praias de com origem em fontes terrestres, como descargas fluviais e concentração populacional ao longo da costa, e devido a fontes marinhas, como a pesca e as atividades marítimas recreativas, além de ser uma rota importante para embarcações comerciais e navios de cruzeiro (Martins & Sobral, 2011).

Foram realizados estudos com o objetivo de quantificar a acumulação de MP em praias ao longo da costa de Portugal Continental e identificar uma relação de proximidade entre a abundância de MP e as áreas de acumulação potenciais, como a proximidade de instalações portuárias, áreas urbanas, indústrias de modelagem de plástico e embalagens, e cursos de água do rio. Nestes estudos foram encontradas elevadas concentrações de MP em praias próximas de áreas industriais, de áreas urbanas e/ ou de instalações de porto de carga e de praias influenciadas por ventos predominantes do Norte. (Antunes et al., 2018).

As correntes oceânicas transportam plástico flutuante de fontes terrestres e marítimas para zonas de convergência central no oceano aberto, onde esses materiais se acumulam (Cózar et al., 2015). No entanto, a avaliação da poluição marinha por plástico é relativamente recente, e extensas áreas do oceano permanecem ainda inexploradas, incluindo mares regionais semifechados localizados em bacias com intenso uso de plástico, como é o caso do Mar Mediterrâneo. Estudos demonstraram que o Mar Mediterrâneo é uma zona de grande acumulação de detritos plásticos (Cózar et al., 2015).

Segundo um estudo publicado pela World Wildlife Fund (WWF) com base em 5 praias amostradas em Portugal cerca de 72% dos plásticos recolhidos nos sedimentos em zonas industriais e de estuários eram constituídos por microplásticos. Ao longo da costa portuguesa entre 2002 e 2008, em 152 amostras analisadas verificou-se a presença de microplásticos em 61% das amostras, com maiores densidades de microplásticos na zona da Costa Vicentina e Lisboa, devido à proximidade aos estuários do Tejo e Sado. (ANP e WWF, 2019)

3 Circulação Oceânica Costeira

A tensão do vento sobre a superfície do oceano é o principal fator de forçamento para a circulação oceânica (Talley et al., 2011, p.142), e pode ser induzida de duas formas: diretamente, quando o vento produz circulação horizontal devido ao efeito de atrito nas camadas superiores do oceano e ondas de superfície (Talley et al., 2011, p.197); ou indiretamente quando gera convergência ou divergência na camada superficial que, por sua vez, provocam circulação horizontal devido a gradientes de pressão e circulação vertical ascendente ou descendente (Talley et al., 2011, p.197).

A tensão do vento em contacto com a camada superficial através de processos viscosos estende-se até algumas dezenas de metros de profundidade. Para escalas de tempo próximas ou superiores a um período inercial, a resposta é afetada fortemente pela aceleração de Coriolis. Esta camada que sofre a influência direta do vento é denominada por Camada de Ekman. Os únicos processos físicos incluídos nesta camada são o atrito e a aceleração de Coriolis. A velocidade na camada de Ekman é maior na superfície e decai exponencialmente até uma profundidade de cerca de 50 metros. Esta profundidade coincide com a da camada de mistura ou profundidade da zona eufótica (zona da coluna de água em que a penetração de luz permite a fotossíntese e onde, portanto existe produtividade primária) (Talley et al., 2011, p.197).

A velocidade da corrente à superfície da camada de Ekman faz um ângulo de 45° (valor teórico embora o observado seja inferior) com a velocidade do vento, ou seja, 45° para a direita do vento no hemisfério Norte e 45° para a esquerda no hemisfério sul. A velocidade da corrente à superfície é diretamente proporcional ao coeficiente de atrito do vento, e inversamente proporcional ao coeficiente de difusão vertical de quantidade de movimento (turbulenta). A magnitude do vetor velocidade diminui exponencialmente com o aumento da profundidade e o vetor de velocidade roda linearmente para a direita no hemisfério Norte (e para a esquerda no hemisfério Sul) à medida que a profundidade aumenta. A profundidade onde a corrente faz um ângulo de 180° com a velocidade de deriva, a base da camada onde se faz sentir o vento, ou seja, a profundidade de influência do atrito (Fiúza, 1980). O transporte na camada de Ekman está dirigido a 90° para a direita do vento no hemisfério norte (e para a esquerda no hemisfério sul) (Talley et al., 2011, p.198).

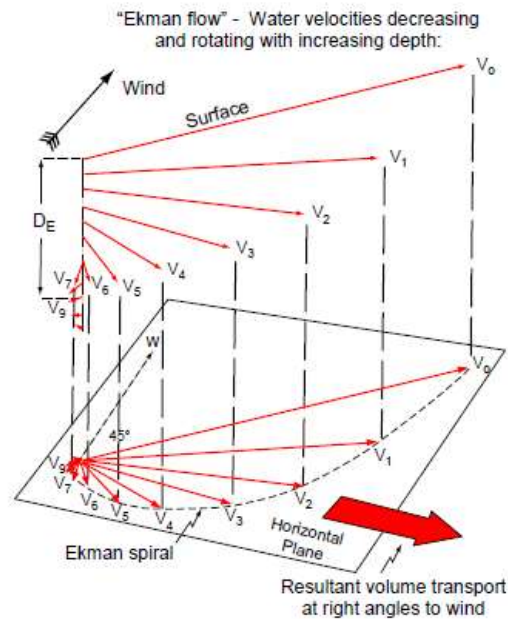


Figura 3.1. Esquema das velocidades na camada de Ekman (Hemisfério Norte). Velocidade da água em função da profundidade (projeção superior). A seta vermelha mais larga representa a direção do transporte total de Ekman, que é perpendicular ao vento (Talley et al., 2011, p.198).

Com a variação espacial da tensão do vento o transporte de Ekman também varia podendo resultar em movimentos verticais de afloramento (upwelling) ou de convergência (downwelling) dentro da camada. No litoral, se o vento sopra ao longo da costa, o transporte de Ekman é perpendicular à costa induzindo afloramento ou convergência (Talley et al., 2011, p.199).

No Oceano Atlântico, a circulação superficial é dominada pelos sistemas de correntes de grande escala gerados pelo vento, os chamados giros oceânicos. Os giros e as suas correntes de fronteira ocidentais incluem giros subtropicais anticiclônicos no Atlântico Norte (Corrente do Golfo e Corrente do Atlântico Norte) e no Atlântico Sul (Corrente do Brasil), e um giro subpolar ciclônico a norte do Atlântico Norte (Corrente de leste da Gronelândia e Corrente do Labrador). Os giros subtropicais incluem sistemas de upwelling de correntes de fronteiras orientais (Talley et al., 2011, p.245).

O sistema de correntes subtropical do limite ocidental consiste no sistema da Corrente do Golfo e a norte da Corrente do Atlântico Norte (North Atlantic Current - NAC). Os sistemas de correntes das Canárias e de Portugal constituem o sistema de correntes da fronteira oriental (Talley et al., 2011, p.252).

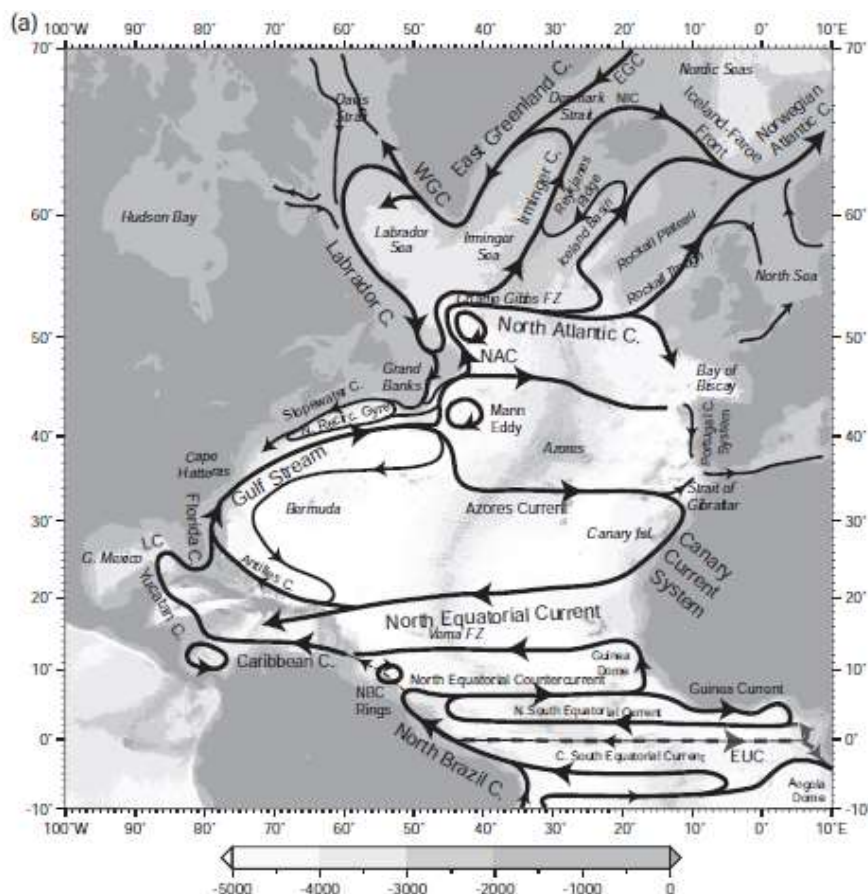


Figura 3.2. Esquema do sistema de circulação superficial no Oceano Atlântico Norte (Talley et al., 2011, p.246).

O giro subtropical tem um clássico regime de upwelling na fronteira oriental (este): o sistema de correntes das Canárias a sul do Estreito de Gibraltar e o sistema de Correntes dos Açores, que está associada à entrada do Mediterrâneo (Talley et al., 2011, p.245).

A corrente de Portugal faz parte do fluxo médio sul ao longo da fronteira leste a norte do Estreito de Gibraltar. A entrada de água (inflow) vem de um ramo da corrente NAC, que se encontra a 45°N. A sazonalidade é marcada, com os ventos de sul na primavera e no verão, revertendo para norte no outono e no inverno. Isto cria uma inversão no fluxo da superfície costeira do equador no verão (Corrente de Portugal), em direção aos polos no outono e no inverno (Contracorrente Costeira de Portugal). Sendo assim, a primavera e o verão são estações de upwelling (Talley et al., 2011, p.259).

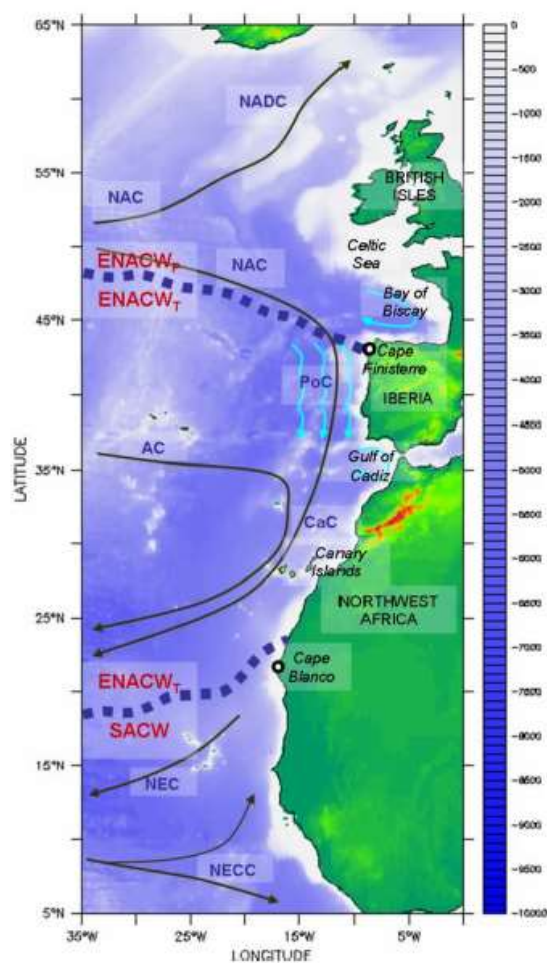


Figura 3.3. Sistema de correntes do bordo leste do Atlântico Norte. Estão identificadas a Corrente de Deriva do Atlântico Norte (North Atlantic Drift Current - NADC), a Corrente do Atlântico Norte (North Atlantic Current - NAC), a Corrente de Portugal (Portugal Current - PoC), a corrente dos Açores (Azores Current - AC), a Corrente das Canárias (Canary Current - CaC), a Corrente Equatorial do Norte (North Equatorial Current - NEC), e a Contra Corrente Equatorial do Norte (North Equatorial Counter-Current - NECC). Estão também identificadas as massas de água central: Água Central Oriental do Atlântico Norte de origem sub-polar (Eastern North Atlantic Central Water of sub-polar origin - ENACWP), a Água Central Oriental do Atlântico Norte de origem sub-tropical (Eastern North Atlantic Central Water of sub-tropical origin - ENACWT) e a Água Central do Atlântico Sul (South Atlantic Central Water - SACW) (de Mason et al., 2005). (Hurduduc, 2018).

A Península Ibérica (PI) estende-se desde a zona mais SO de Portugal (~36°N) até à região mais NO da Galiza (~44°N) (Lopes, 2012) e situa-se na parte norte do sistema de afloramento da Corrente das Canárias (CC) (Dias, 2015). O território de Portugal continental situa-se na zona oeste na PI e faz fronteira com o oceano Atlântico, e estende-se ao longo de meridiano 9°W entre os 37°N e os 42°N (Fiúza et al., Climatological space and time variation of the Portuguese coastal upwelling, 1982).

Na Península Ibérica os fenómenos de afloramento costeiro ocorrem principalmente na Primavera e no Verão, onde os ventos de norte prevalecem (Cardoso, 2008), produzindo uma corrente à superfície para sul e uma corrente para norte, a cerca de 200 metros de profundidade, a qual corre ao longo da vertente ou talude (Borges et al., 2009). No inverno, o sistema de circulação do oceano na bacia Ibérica é resultado de diferentes mecanismos de forçamento e de interações com a circulação do oceano aberto (Dias, 2015), onde de acordo com Peliz et al. (2003a,b), a circulação faz-se predominante para Norte, devido parcialmente à diferença de densidade das águas (Borges et al., 2009). Esta corrente transporta águas quentes de elevada salinidade (subtropical) ao longo da vertente e do cotovelo da plataforma (Frouin et al., 1990; Haynes e Barton, 1990) e que de acordo com Peliz et

al. (2003b) designam por Iberian Poleward Current (IPC). (Borges et al. 2009). Contudo, segundo Peliz et al. (1999) e Ribeiro et al. (2004) foram também observados eventos de upwelling durante o Inverno, quando o regime de ventos é particularmente favorável à convergência ou downwelling (Cardoso, 2008).

4 Metodologia

Um modelo numérico oceânico é uma aproximação do oceano, representado por um conjunto de equações, na forma de linguagem de programação, que descrevem os processos físicos que determinam o funcionamento do oceano. Os processos físicos são: o movimento/dinâmica do oceano, incluindo processos de mistura e dissipação horizontal e vertical de energia entre o oceano e as fontes externas (como a radiação, a precipitação, a evaporação, o escoamento do rio, o vento, etc), e processos tridimensionais de mistura e dissipação (Ansong, 2016).

Os modelos oceânicos ajudam na compreensão da dinâmica tridimensional do oceano à escala global. Ou seja, a dinâmica do oceano inclui a circulação geral, as ondas, as marés, a turbulência, as instabilidades, a convecção, a mistura, os jatos, etc (Ansong, 2016).

4.1 Métodos Eulerianos e Lagrangianos para o cálculo das trajetórias

O oceano mostra uma enorme variedade de movimentos, que abrangem escalas de milímetros a milhares de quilómetros. À medida que a água se move, cada partícula do fluido contém traçadores, como o sal, os nutrientes, o calor, bem como partículas, como larvas e detritos marinhos (plástico). Nas aplicações teóricas e práticas, é interessante analisar como a água se move entre as regiões dos oceanos, ou seja, de mapear as trajetórias dos movimentos da água do mar, e os períodos desse transporte. Este estudo é importante para entender o papel que o oceano desempenha no clima e na ecologia marinha (Van Sebille et al., 2017).

Existem dois métodos para estimar as trajetórias no oceano. O método lagrangiano é baseado na descrição de um fluido num referencial que se move com uma partícula infinitesimal (equivalente a uma parcela de um fluido). O movimento do fluido é, portanto, o resultado do movimento contínuo da partícula. O método euleriano baseia-se na descrição do movimento do fluido num referencial que está fixo no espaço. Em geral, o objetivo técnico da análise lagrangiana oceânica é estimar a trajetória de partículas passivas de um fluido, utilizando informação euleriana, ou seja, do campo de velocidades das correntes em pontos definidos no espaço (Van Sebille et al., 2017).

A circulação oceânica abrange uma enorme variedade de camadas e regiões e normalmente os estudos de trajetórias de partículas passivas concentram-se principalmente em aplicações em bacias oceânicas e em escalas globais. No entanto, existe trabalho de análise lagrangiana feito em escalas menores, como em zonas costeiras (Van Sebille et al., 2017).

4.2 Modelo Numérico (ROMS)

O modelo ROMS (Regional Ocean Modeling System) é um modelo numérico oceânico de superfície livre, 3D discretizado num sistema de coordenadas verticais que acompanham o terreno (classe de modelos de coordenadas sigma) (Forecast, 2016).

Este modelo é utilizado para prever como uma determinada região do oceano responde aos forçamentos físicos, como o aquecimento ou o vento. No entanto, também é utilizado para modelar como um determinado sistema oceânico responde aos sedimentos, à água doce, ao gelo ou aos nutrientes (myroms.org).

Os modelos numéricos oceânicos utilizam cada vez mais sistemas de coordenadas sigma (σ). A principal vantagem do sistema sigma é que, quando transformado em diferenças finitas é obtida uma representação suave da topografia do fundo, sendo também possível incorporar facilmente uma camada limite do fundo, bem como uma camada limite da superfície (Mellor et al., 2002).

O modelo ROMS tem sido adaptado para diferentes regiões do mundo. Neste estudo foi utilizado um ano de simulações em toda a área da costa ibérica ocidental, com uma resolução horizontal de 2,3 km. A configuração deste modelo foi adaptada da versão ROMS-AGRIF (Regional Ocean Model System Adaptive Mesh Refinement In Fortran) que possui uma capacidade dinâmica de aninhamento das malhas (citado por Debreu et al., 2012). (Teles-Machado et al., 2015).

O ROMS é um modelo que pode ser executado para avaliar alterações ao longo de um determinado período. Encontra-se dividido em camadas verticais que constituem a coluna de água e células horizontais que constituem as coordenadas do plano cartesiano 2D da região do modelo (myroms.org). Em geral, os esquemas utilizados pelo ROMS são governados por três equações: a equação da continuidade, a equação da conservação de momento e as equações de transporte de variáveis traçadoras (como a salinidade e a temperatura) (myroms.org). Os modelos de circulação oceânica mais realistas são normalmente baseados na aproximação de Boussinesq, nos balanços de momento hidrostático e de massa, na conservação de material traçador, na equação do estado da água e na parametrização do transporte às escalas inferiores à grelha. Para facilitar o cálculo da força do gradiente de pressão, o tempo de integração do modelo é feito por separação ou decomposição dos campos tridimensionais numa componente barotrópica (média em profundidade) e uma baroclínica (resíduos relativamente à média). (Shechepetkin et al., 2005)

O ROMS assume a aproximação de Boussinesq, ou seja, simplifica as equações do movimento, considera que a água é um fluido incompressível, que as velocidades no oceano são inferiores quando comparadas à velocidade do som e que a escala vertical do movimento também é pequena. O modelo também assume a aproximação Hidrostática (despreza as acelerações inerciais no momento vertical), ou seja, simplifica a componente vertical da velocidade e considera um balanço hidrostático rigoroso em todas as escalas (Curchitser & Turuncoglu, 2015). Nestas condições, o modelo resolve a equação de Navier-Stokes com a aproximação de Boussinesq e assume a incompressibilidade de fluidos (Forecast, 2016).

A malha do modelo, o forçamento atmosférico, os ficheiros de inicialização e de climatologia foram construídos a partir da base de dados ROMSTOOLS. A topografia/batimetria teve origem nos dados ETOPO2 (National Geophysical Data Center – NGDC). O modelo foi inicializado em janeiro com a climatologia Levitus WOA05 (citado por Locarnini et al. (2006) e Antonov et al. (2006)). O

forçamento externo e os fluxos de quantidade de movimento, calor e água doce foram extraídos do Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS). (Teles-Machado et al., 2015)

O forçamento atmosférico foi obtido a partir dos resultados do modelo Weather Research and Forecast (WRF), com saídas horárias e com resolução horizontal de 27 km (citado por Soares et al., 2012). A simulação do modelo WRF tem sido largamente validada contra observações de precipitação e de temperatura do ar da rede meteorológica nacional, e também contra observações regularmente distribuídas em todo o domínio ibérico (citado por Cardoso et al., 2013 e Soares et al., 2013). (Teles-Machado et al., 2015). A resolução temporal dos dados do modelo é de 5 em 5 dias.

4.2.1 Equações do movimento

Para a modelação oceânica é necessário conhecer as equações do movimento (fluxo) de fluidos (equações de Navier-Stokes), como discretizar as equações, conhecer alguma análise numérica, entre outros (Ansong, 2016).

Um fluido é um corpo cuja forma pode ser alterada quando uma força lhe é aplicada, ou seja, os fluidos não resistem a forças de cisalhamento (movimentos turbulentos de origem mecânica) (Raphaldini et al., 2017a).

Podemos descrever o campo de velocidades de duas formas: a primeira descreve, a cada instante t , a velocidade da partícula na posição a ; a segunda consiste em descrever a cada instante t a velocidade num ponto com uma dada posição $x = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ (Raphaldini et al., 2017a).

A primeira abordagem é conhecida como descrição Lagrangiana, ou seja, dada a posição de uma partícula $x(0) = a$, encontrar a trajetória desta partícula. Enquanto a segunda abordagem é chamada de descrição Euleriana, que consiste em proporcionar, a cada momento, o campo de velocidades do fluido (Raphaldini et al., 2017a).

A conservação de momento, ou mais precisamente o balanço de momento em um fluido, decorre da segunda lei de Newton aplicada ao fluido. A segunda lei de Newton afirma que a taxa de variação de momento dum corpo ou duma porção do fluido é igual à soma das forças a ele aplicadas. A equação da conservação de momento é dada por (Raphaldini et al., 2017a):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_t} \rho u dx = F \quad (4.1)$$

Supondo que num dado ponto à superfície da Terra, descrito pelas suas coordenadas latitude e longitude (θ, ϕ) , se pretende escrever as equações de movimento válidas num sistema de coordenadas cartesianas local ao redor deste ponto (Raphaldini et al., 2017b).

A equação da conservação de momento em coordenadas cartesianas é assim dada por (WikiROMS, 2015):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} - v \frac{\partial u}{\partial t} \right) + \mathcal{F}_u + D_u \quad (\text{Direção } x) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + f v = -\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{v'w'} - v \frac{\partial v}{\partial t} \right) + \mathcal{F}_v + D_v \quad (\text{Direção } y) \quad (4.3)$$

A Equação da advecção-difusão é dada por (WikiROMS, 2015):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{C'w'} - v \frac{\partial C}{\partial t} \right) + \mathcal{F}_C + D_C \quad (4.4)$$

onde, $C(x, y, z, t)$ (por exemplo, salinidade, temperatura ou nutrientes) é o vetor de concentração.

A Equação de Estado é dada por (WikiROMS, 2015):

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (4.5)$$

Na aproximação de Boussinesq, as variações de densidade são desprezadas nas equações do momento, exceto quando estão presentes a força de impulsão (flutuabilidade) combinadas com a força de gravidade. Na equação da aproximação hidrostática assume-se que o gradiente vertical de pressão é equilibrado pela força de impulsão (WikiROMS, 2015):

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \quad (4.6)$$

Para um fluido incompressível a Equação da Continuidade é dada por (WikiROMS, 2015):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.7)$$

Para o momento, os efeitos de forçamento e de dissipação horizontal serão representados pelos termos F e D , respetivamente. A mistura horizontal e vertical é mais detalhada nas Parametrizações de Mistura Horizontal e Mistura Vertical (WikiROMS, 2015).

Os termos utilizados encontram-se na lista de abreviaturas e símbolos (WikiROMS, 2015).

Essas equações são fechadas pela parametrização das tensões de Reynolds e dos fluxos turbulentos (WikiROMS, 2015):

$$\overline{u'w'} = -K_M \frac{\partial u}{\partial z}; \quad \overline{v'w'} = -K_M \frac{\partial v}{\partial z}; \quad \overline{C'w'} = -K_C \frac{\partial C}{\partial z} \quad (4.8)$$

4.3 Modelo Lagrangiano L-TRANS

O modelo utilizado para simular as partículas ao longo da costa ibérica foi o Larval TRANSport Lagrangian model (LTRANS). Este é um modelo de trajetórias de partículas offline, executado a partir de previsões de um modelo hidrodinâmico 3D. Esse modelo hidrodinâmico é o modelo Regional Ocean Modeling System (ROMS). (Schlag & North, 2012, pp.1-12)

O modelo de trajetórias de partículas foi inicialmente desenvolvido para simular o percurso de larvas de ostra, mas pode ser facilmente adaptado para simular partículas passivas e outros organismos planctónicos (organismos minúsculos que flutuam no oceano a favor da corrente) (Schlag & North, 2012, pp.1-12).

O LTRANS está escrito em linguagem Fortran 90 e foi desenhado para simular trajetórias de partículas em três dimensões. Este modelo inclui um esquema de Runge-Kutta de 4ª ordem para a advecção de partículas e um modelo de deslocamento aleatório para o movimento turbulento vertical de partículas. (Schlag & North, 2012, pp.1-12)

4.3.1 Estrutura do Modelo

As três dimensões projetadas pelo modelo LTRANS utilizadas para prever o movimento das partículas têm como base a advecção, a turbulência e o comportamento larval. Tem um passo de tempo externo e interno, e algoritmos de condição de fronteira que impedem as partículas de sair do domínio do modelo. O passo de tempo externo (dt) é o passo de tempo do output do modelo hidrodinâmico, ou seja, é o intervalo de tempo em que o modelo apresenta os resultados (por exemplo, 5 [dias] x 86400 [s] = 432000 [s]). O passo de tempo interno (idt) é o intervalo de tempo durante o qual os movimentos das partículas são calculados (por exemplo, a cada 30 segundos). (Schlag & North, 2012, pp.1-12)

Em cada passo de tempo interno, o movimento da partícula é calculado como a soma dos movimentos devido à advecção, à turbulência e ao comportamento larval. Este modelo contém submodelos para cada uma destas componentes. As componentes da turbulência e do comportamento podem ser desativadas, de modo que o movimento das partículas de baseie unicamente na advecção. (Schlag & North, 2012, pp.1-12)

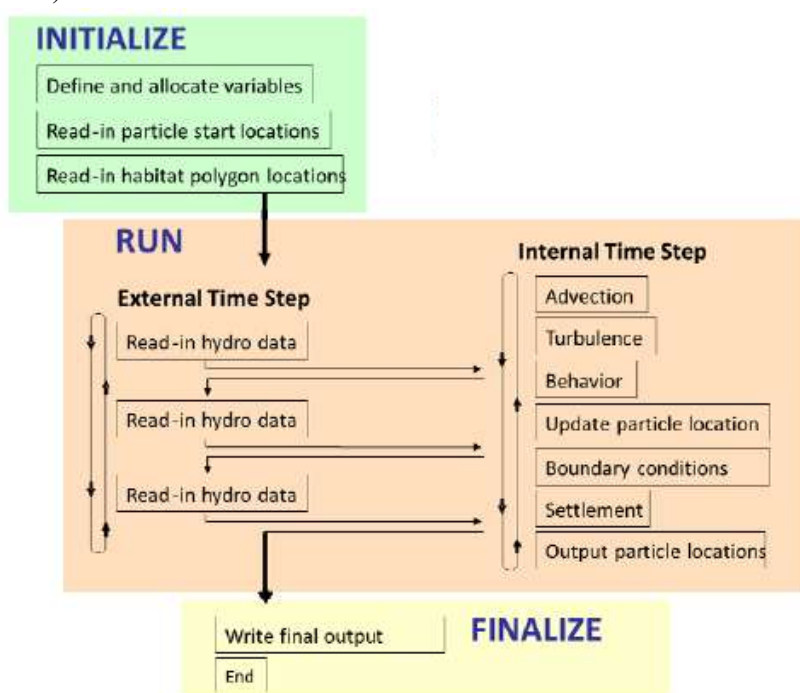


Figura 4.1. Diagrama do modelo LTRANS (Schlag & North, 2012).

4.3.2 Esquema de Interpolação

Os dados do modelo oceânico (ROMS) estão armazenados no formato NETCDF. O primeiro passo na interpolação das propriedades da água (por exemplo, a temperatura, a salinidade, as velocidades das correntes, a altura da superfície do mar e as difusividades verticais e horizontais) para a posição de uma partícula é determinar a célula da grelha ou da malha em que a partícula está localizada. Este modelo utiliza a abordagem de cruzamentos point-in-polygon (PIP) acoplada com um algoritmo de pesquisa para melhorar a eficiência computacional (Schlag & North, Overview, 2012). O cálculo (PIP) consiste em determinar se um dado ponto repousa dentro, fora ou no bordo de um polígono (Wikipédia, point in polygon).

Todas as propriedades da água são interpoladas a partir dos pontos originais das malhas do ROMS. Ou seja, os pontos da malha das componentes u e v são utilizados para interpolar as mesmas componentes na posição da partícula e os pontos da malha “rho” são utilizados para interpolar a altura da superfície do mar, a componente w da velocidade, a salinidade e nos cálculos da difusividade (Schlag & North, 2012, pp.1-12).

Enquanto que para as propriedades bidimensionais da água (por exemplo, a altura da superfície do mar e a profundidade do mar) é utilizada uma interpolação bilinear, para as propriedades tridimensionais da água (por exemplo, as velocidades das correntes, as difusividades e a salinidade) é aplicado um esquema do perfil da coluna de água. Neste esquema, os valores são interpolados ao longo da costa de cada s -level para criar um perfil vertical de valores na posição da partícula x - y (Schlag & North, 2012, pp.1-12).

4.3.3 Condições Fronteira

A localização de cada partícula é testada a cada passo de tempo interno para garantir que ela permaneça dentro dos limites do modelo. Se o movimento da partícula fizer com que ela exceda os limites, a partícula será colocada dentro do domínio do modelo conforme descrito a seguir (Schlag & North, 2012, pp.1-12). Este teste é realizado até que a partícula se imobilize.

As condições fronteira horizontais refletivas mantêm as partículas dentro do domínio do modelo. Os limites são definidos a meio caminho entre os pontos água e os pontos terra. Os pontos de fronteira terrestre/marítima principal e de cada ilha individual são ordenados para definir polígonos fechados. A abordagem PIP é utilizada para determinar se uma partícula está dentro ou fora dos limites do modelo. Se a partícula se encontra em terra ou numa ilha, é refletida na fronteira com um ângulo de reflexão que equivale ao ângulo de aproximação da fronteira. A distância a que a partícula é refletida é igual à distância que a partícula percorre depois de atravessar a fronteira. A rotina de condição de limite horizontal permite múltiplas reflexões dentro de um passo de tempo. Nos limites do oceano aberto, o utilizador pode especificar “refletir” ou “atravessar” a fronteira. Se a partícula puder “atravessar” a fronteira do oceano aberto, cessará o movimento na fronteira até ao final da simulação. (Schlag & North, 2012, pp.1-12).

Os limites verticais (superfície e fundo) são especificados para cada partícula interpolando a altura de superfície do mar e a profundidade inferior à localização (x , $-y$) da partícula. Se uma partícula passar pela superfície ou pelo limite inferior devido à turbulência ou advecção vertical, a partícula é colocada de volta no domínio do modelo a uma distância igual à distância que a partícula excede o limite (ou seja, é refletida verticalmente) se uma partícula ultrapassar a superfície ou o fundo, devido ao seu comportamento, é colocada sob a superfície ou acima do fundo, (ou seja, ela para perto do limite). (Schlag & North, 2012, pp.1-12).

Se a partícula for encontrada quer fora das fronteiras principais, quer dentro das fronteiras das ilhas, o programa escreve “Error: Particle Outside Main Boundaries After Intersect_reflect. Model Run Cannot Continue.” (Figura 4.2), devolve as coordenadas actuais e anteriores da partícula e pára (Schlag & North, 2012, pp.34-54).

```
OpenSSH SSH client
output metric blanking file
initialize behavior
finding each particle's initial element
./input/roms_avg1.nc
Time to initialize model = 11.489 seconds.

***** BEGIN ITERATIONS *****
write output to file, day = 0.5000000000000000
write output to file, day = 1.0000000000000000
write output to file, day = 1.5000000000000000
write output to file, day = 2.0000000000000000
write output to file, day = 2.5000000000000000
write output to file, day = 3.0000000000000000
write output to file, day = 3.5000000000000000
write output to file, day = 4.0000000000000000
write output to file, day = 4.5000000000000000
write output to file, day = 5.0000000000000000
write output to file, day = 5.5000000000000000
write output to file, day = 6.0000000000000000
write output to file, day = 6.5000000000000000
write output to file, day = 7.0000000000000000
write output to file, day = 7.5000000000000000
ERROR: Particle Outside Main Boundaries After intersect_reflect
Model Run Cannot Continue

Previous Location:
x: 510420.450453886 y: 511082.698494061
lon: -8.79166670362588 lat: 38.3442326130240

Current Location:
x: 510420.450453886 y: 511082.698494063
lon: -8.79166670362601 lat: 38.3442326130240

mariana@modi2:~/particlesRun>
```

Figura 4.2. Exemplo de mensagem de erro de execução do modelo LTRANS.

4.3.4 Inicialização

Para a realização das simulações, foram alterados apenas o número de partículas a simular, e a variável *days*, que corresponde ao intervalo de tempo em que a partícula efetua a sua trajetória. Os grupos de parâmetros que não foram ativados para a execução deste modelo foram os parâmetros do módulo de turbulência e do módulo de consolidação (Settlement). Nos parâmetros do módulo do comportamento da partícula a variável *Behavior* corresponde ao tipo de comportamento (passivo; orientação perto da superfície; orientação perto do fundo; migração vertical diurna; larvas de ostras *Crassostrea virginica*; ou *C. ariakensis*; velocidade de afundamento; transporte por correntes de marés) e é representada por inteiros. Nas simulações a esta variável foi atribuído o valor zero, ou seja, tipo “passivo”. (Schlag & North, 2012, pp.55-73). Neste estudo, as partículas são consideradas passivas pois possuem o mesmo comportamento de um elemento de fluido no escoamento, sendo que o tipo de partícula não é considerado. Nestes modelos não foi considerada a maré o que pode ter influência nos resultados.

4.3.5 Ficheiros de entrada

Foram criados vários ficheiros CSV (Comma Separated Values) com o nome de `Initial_particle_locations`, da seguinte maneira: na primeira coluna, a latitude inicial; na segunda coluna, a longitude inicial; na terceira coluna, a profundidade inicial e na quarta coluna, o instante em que a partícula inicia a sua trajetória em segundos. Neste caso, a coluna do tempo preenchida com zeros significa que a partícula inicia a sua trajetória no início dos dados do ROMS, ou seja, no dia 3 de janeiro de 1991 às 12h. Estes ficheiros CSV foram criados através da linguagem de programação Python.

Neste trabalho, o modelo foi executado de dois em dois meses ao longo de um ano de simulação. Foi alterada a variável *days* para informar ao modelo o número de dias da simulação, ou seja, se a variável *days* for igual a 60 e se no ficheiro `Initial_particle_locations.csv` a coluna do tempo preenchida com zero, significa que a partícula inicia a sua trajetória no início dos dados modelo ROMS (coluna preenchida com zeros) e o modelo é executado durante 60 dias, neste caso no dia 3 de janeiro, e só termina o seu percurso após 60 dias (no dia 3 de março). Se a partícula inicializar no dia 3 de março a coluna do tempo tem de ser preenchida com o tempo em segundos correspondentes a esse mês, e a variável *days* tem de conter os dias desde do início do modelo até ao final da simulação pretendida (até 1 de maio), ou seja, a variável *days* será igual a 60 dias (3 de janeiro a 3 de março) + 60 dias de simulação (3 de março a 1 de maio), e assim sucessivamente para as outras simulações.

Para executar o modelo LTRANS foi necessário aceder remotamente a um computador através da consola ou linha de comandos do computador local, e foram utilizados comandos básicos SSH para executar programas, bem como editar, manipular e transferir ficheiros no Sistema Operativo Linux. Ao executar o comando `./LTRANS.exe`, este cria um ficheiro de saída `output.nc`. Esse ficheiro contém as variáveis: *age* (idade das partículas), *color* (identificação do comportamento de cada partícula), *lat* (latitude da posição da partícula), *lon* (longitude da posição da partícula), *depth* (profundidade na posição da partícula), *dob* (data de ocorrência da partícula em segundos a partir do início do modelo), *temperature* (temperatura na posição da partícula), *salinity* (salinidade na posição da partícula) e *model_time* (tempo decorrido no modelo).

5 Resultados e análise

O sistema LTRANS-ROMS é o resultado das simulações das trajetórias das partículas com base nas velocidades do modelo oceânico ROMS.

Para cada ponto da malha foram calculadas as médias de cada uma das componentes u e v ao longo de cada um dos períodos bimensais. O vetor velocidade da corrente média para cada ponto é então obtido da resultante das médias das duas componentes.

Foram realizadas várias simulações das trajetórias das partículas. Inicialmente, realizaram-se testes com um pequeno número de partículas para estudar a variação da trajetória dessas partículas durante dias e meses, para depois se decidir qual o melhor método para estudar as trajetórias das partículas.

Foram escolhidos dois casos de estudo para se realizarem as simulações. O primeiro caso foi na zona do Tejo e o segundo na zona do Sado. A área em cada zona foi representada por caixas, no formato de polígonos, no qual foram delimitadas até à isóbata dos 100 metros (Figura 5.2(a)). Para construir as caixas foi necessário consultar o mapa de dados batimétricos dos mapas e dos produtos georreferenciados da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (NOOA, Bathymetric Data Viewer) com o objetivo de encontrar as coordenadas que coincidiam com a isóbata dos 100 metros em cada zona. Com a ajuda de uma ferramenta de georreferenciação (Keene, Map Polygon), foram construídas as “caixas” ou polígonos a partir das coordenadas obtidas no mapa de dados batimétricos. De seguida, dentro da área delimitada em cada zona foram escolhidos dois pontos em cada zona (Figura 5.1). Em cada ponto, foram simulados os lançamentos de 400 partículas com intervalos de lançamento de 30 a 30 minutos, durante dois meses durante um ano. As partículas foram lançadas à superfície do oceano.



Figura 5.1. Representação dos pontos de lançamento das partículas para as zonas do Tejo e do Sado. As partículas foram lançadas nos pontos 1 (laranjas) e nos pontos 2 (amarelos).

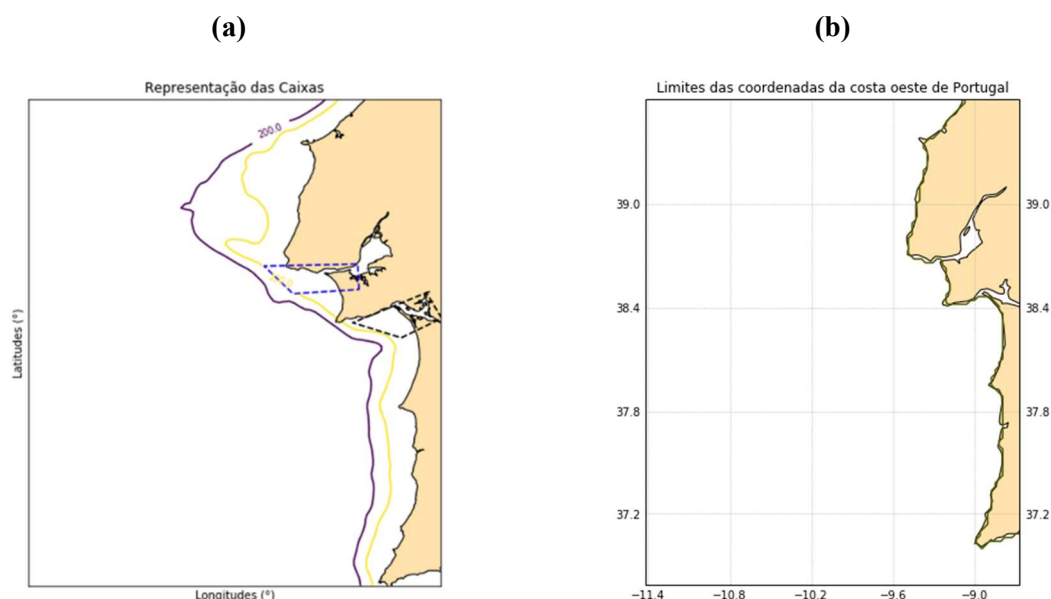


Figura 5.2. (a): Representação dos polígonos para as zonas do Tejo (tracejado azul) e do Sado (tracejado preto); (b): Linha de contorno do modelo LTRANS da costa oeste de Portugal.

5.1 Simulações e análises

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações das trajetórias de partículas lançadas inicialmente nas zonas do Tejo e do Sado, isto é, o percurso de cada partícula durante um período. Estes resultados pretendem demonstrar quais os locais de acumulação/dispersão das partículas no final dos seus percursos, e se os locais de acumulação/dispersão são influenciados pelos períodos em análise. Neste estudo as partículas foram inicializadas à superfície, mas não significa que durante as suas trajetórias as partículas permaneçam à superfície, porque a partícula é considerada passiva, ou seja, não é considerado o tipo de partícula (tamanho e a densidade da partícula). Nestas condições, as partículas poderão não se encontrar sempre a flutuar à superfície ao longo dos períodos em análise. As trajetórias das partículas foram representadas sobre os campos de velocidade da corrente à superfície durante os períodos em análise. Fez-se uma análise da distância média de dispersão/acumulação das partículas, isto é, foram analisados os deslocamentos das partículas desde o seu ponto de lançamento, para verificar se as partículas em análise se afastam ou não dos locais perto da costa. Finalmente, foram relacionados os resultados com estudos anteriores sobre resíduos marinhos encontrados em determinados locais.

5.1.1 Trajetórias das partículas nas zonas do Tejo e do Sado

As trajetórias obtidas foram analisadas para os seis períodos bimensais de 1991: janeiro e fevereiro (JF), março e abril (MA), maio e junho (MJ), julho e agosto (JA), setembro e outubro (SO) e novembro e dezembro (ND). Em cada período, as trajetórias das partículas foram representadas com o campo da velocidade da corrente média à superfície. Cada partícula foi lançada à superfície, o que não significa que todas as partículas continuem a sua trajetória à superfície ao longo do período.

Em JF no Tejo (Figura 5.3(a)) as partículas encontravam-se especialmente perto da costa em direção a noroeste, mas algumas partículas que iniciam no ponto 2 passam junto à área do Sado. Na zona do Sado (Figura 5.3(b)), as partículas dirigem-se para sul junto à costa, e só algumas seguem para noroeste.

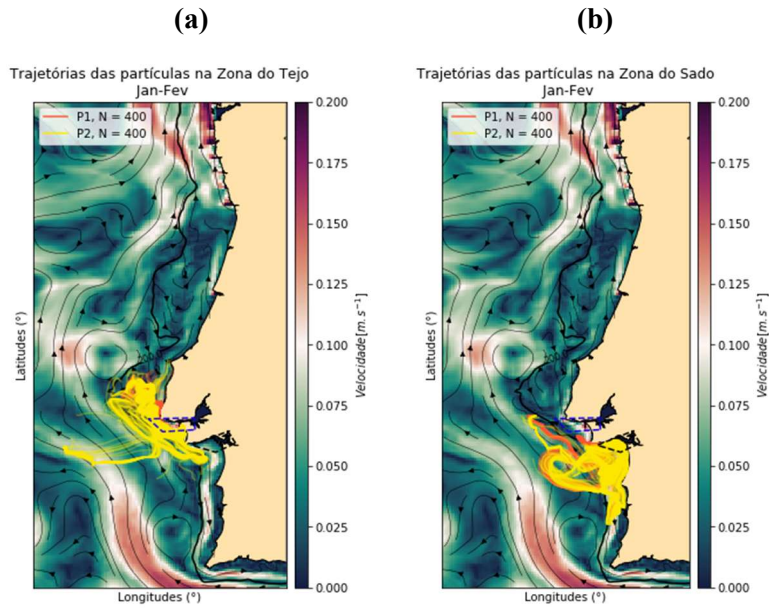


Figura 5.3. Trajetórias das partículas: (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado nos meses de janeiro e fevereiro (JF). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.

Em MA (Figura 5.4) em ambas as zonas as partículas dirigem-se para sul/sudoeste. Apesar das partículas que partem de a zona do Tejo dirigirem-se para sul, não chegam a entrar dentro da zona do Sado.

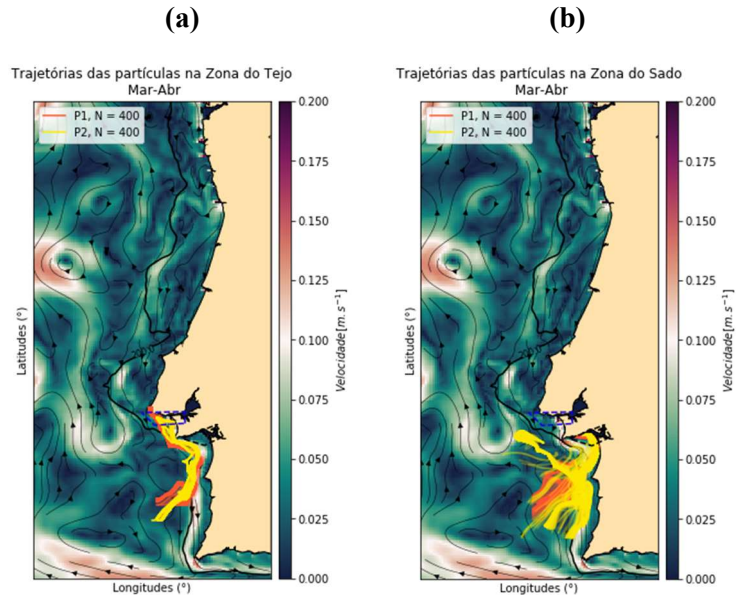


Figura 5.4. Trajetórias das partículas: (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado nos meses de março e abril (MA). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.

Em MJ no Tejo (Figura 5.5(a)), em ambos os pontos, as partículas dirigem-se para sudoeste. Todas as partículas que partem do ponto 1 percorrem praticamente a mesma trajetória, e o mesmo acontece no ponto 2. Verifica-se que seguem na mesma direção que a corrente média à superfície. No Sado (Figura 5.5(b)), as partículas dirigem-se para sul desviando-se para sudoeste. Nesta zona, as partículas que partem do ponto 2 seguem praticamente a corrente à superfície. No entanto, algumas partículas que partem do ponto 1 dirigem-se para noroeste e outras para sul.

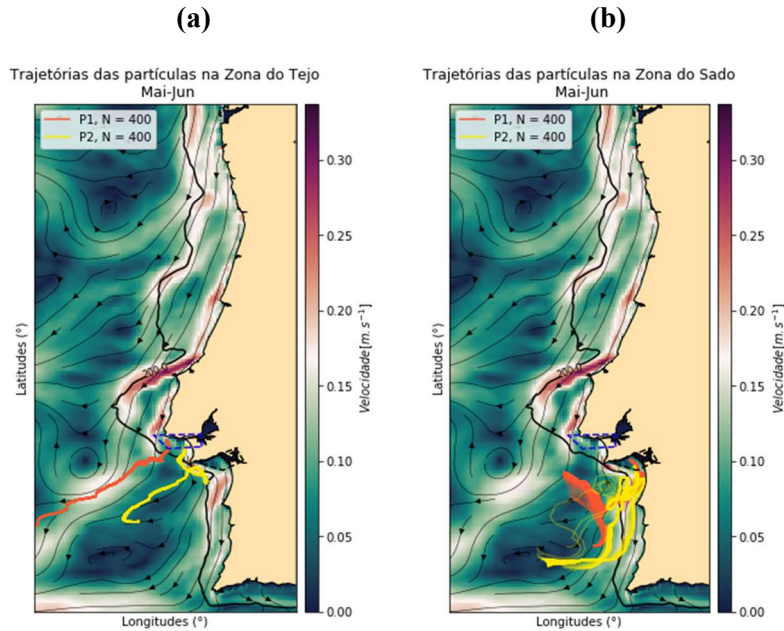


Figura 5.5. Trajetórias das partículas: (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado nos meses de maio e junho (MJ). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.

Em JA no Tejo (Figura 5.6(a)) em ambos os pontos as partículas dirigem-se para oeste. Todas as partículas que partem do ponto 1 seguem praticamente a mesma trajetória, e o mesmo acontece no ponto 2. Na zona do Sado (Figura 5.6(b)) acontece sobretudo o mesmo, só que em ambos os pontos as partículas dirigem-se para sul. Em ambas as zonas, as partículas seguem na direção da corrente média à superfície.

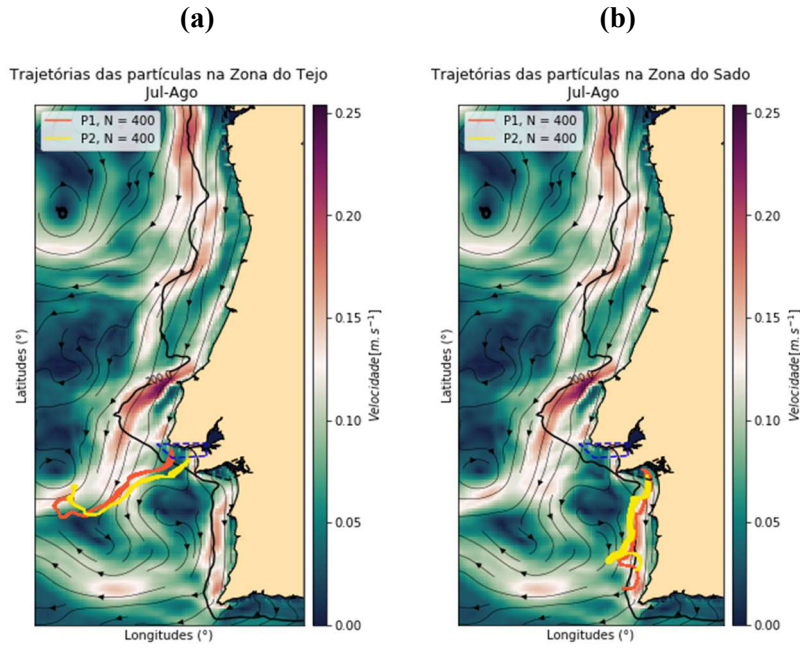


Figura 5.6. Trajetórias das partículas: **(a)** na zona do Tejo; **(b)** na zona do Sado nos meses de julho e agosto (JA). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.

Em SO no Tejo (Figura 5.7(a)), verifica-se que as partículas que partem no ponto 1 dirigem-se para noroeste, enquanto que as que partem do ponto 2 dirigem-se para sul. Pode-se então verificar que apesar de em ambos os pontos as partículas seguirem direções diferentes, ao mesmo tempo seguem a direção da corrente média à superfície. No Sado (Figura 5.7(b)), em ambos os pontos, as partículas seguem para sul/sudoeste. Verifica-se que as partículas em praticamente todo o período seguem com a corrente média à superfície.

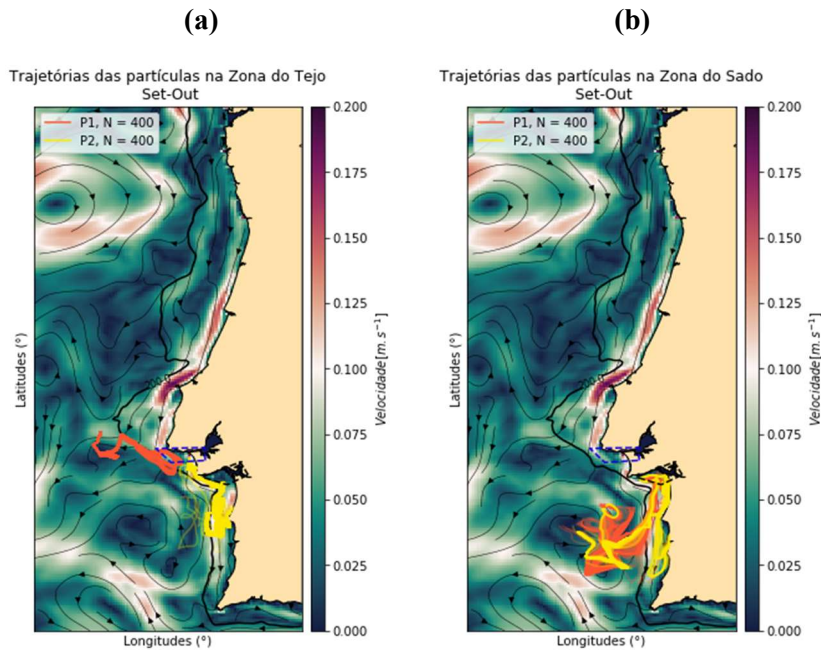


Figura 5.7. Trajetórias das partículas: **(a)** na zona do Tejo; **(b)** na zona do Sado nos meses de setembro e outubro (SO). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.

Em ND no Tejo (Figura 5.8(a)) as partículas que partem do ponto 1 têm sobretudo a mesma trajetória, e o mesmo acontece com as partículas que partem do ponto 2. Em ambos os pontos as partículas seguem a corrente média à superfície. No Sado (Figura 5.8(b)) em ambos os pontos, as partículas no início das suas trajetórias deslocam-se perto da costa e dirigem-se para sul.

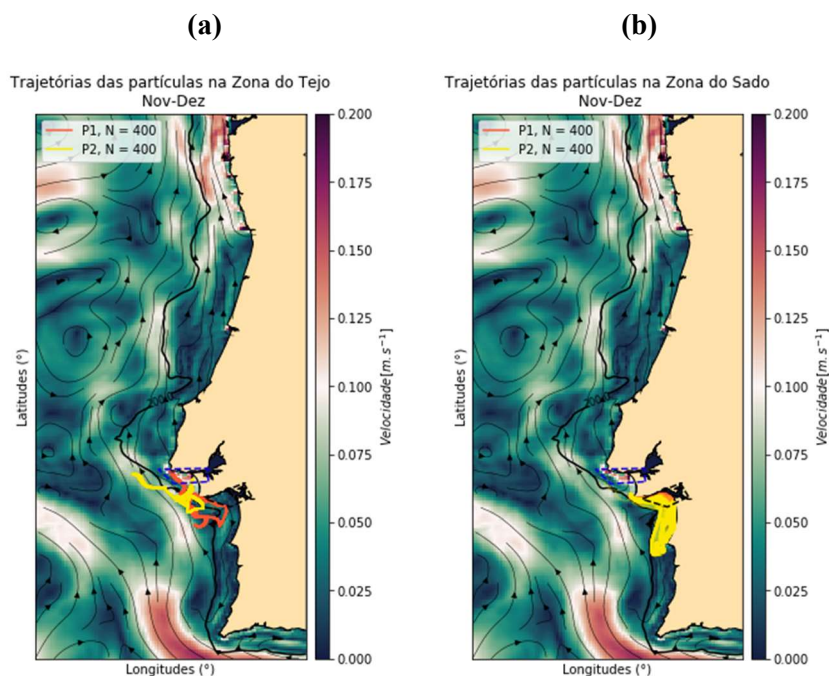
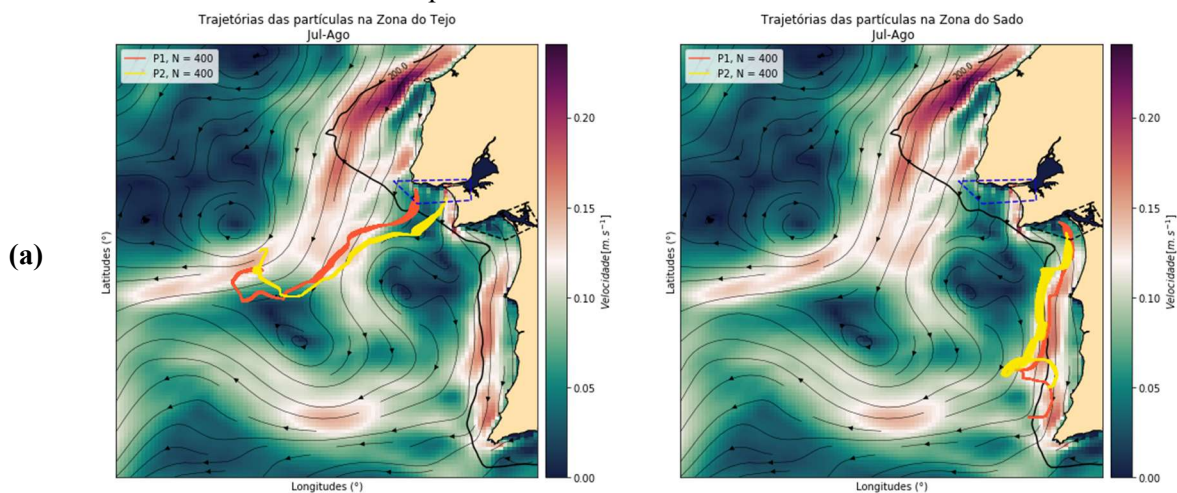


Figura 5.8. Trajetórias das partículas: **(a)** na zona do Tejo; **(b)** na zona do Sado nos meses de novembro e dezembro (ND). As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.

Nos períodos correspondentes ao verão JA (Figura 5.9(a)) e à passagem de verão para outono SO (Figura 5.9(b)) na zona do Tejo, a direção das trajetórias predominante é oeste, apesar de em SO haver uma diferença significativa nas direções das trajetórias que partem do ponto 1 comparadas com as do ponto 2. No Sado, em ambos os períodos, a direção predominante é sul/sudoeste. No caso do Sado, as partículas deslocam-se geralmente na mesma direção da corrente média à superfície, sugerindo que as partículas se encontram na camada superficial.



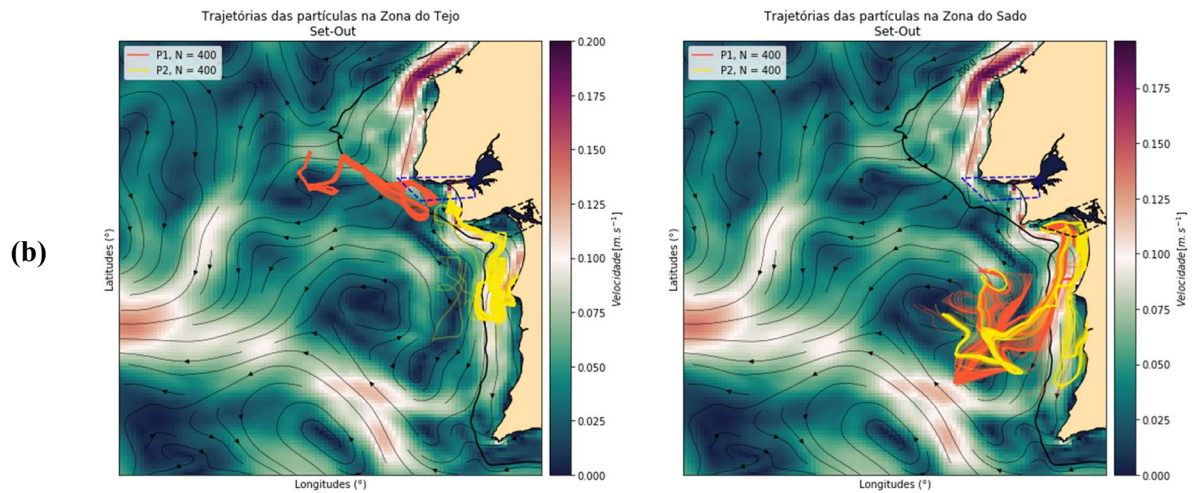
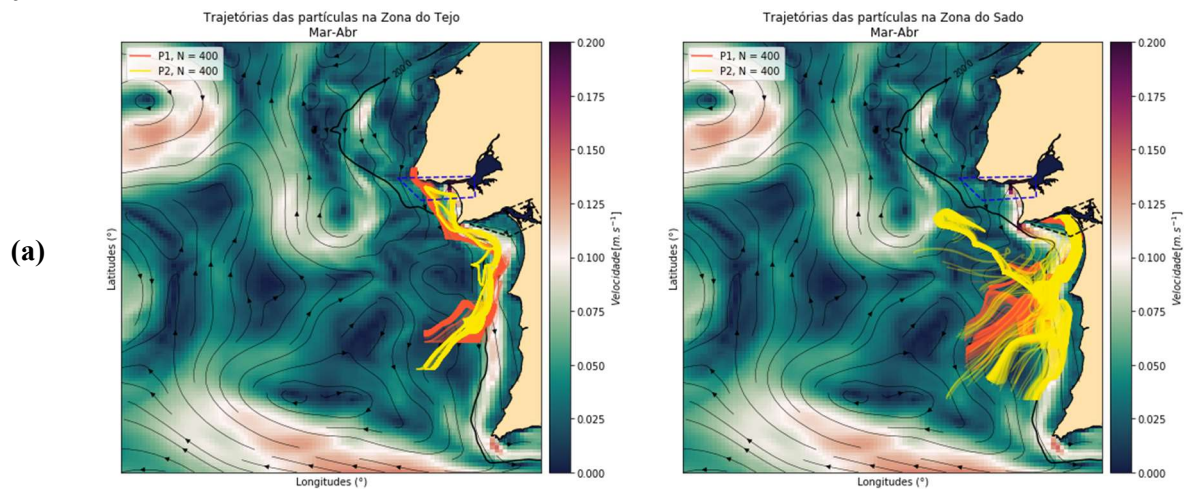


Figura 5.9. Trajetórias das partículas na zona do Tejo e na zona do Sado: (a) nos meses de verão JA; (b) na passagem de verão para outono SO. As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.

Nas passagens de inverno para primavera MA (Figura 5.10(a)) e de primavera para verão MJ (Figura 5.10(b)) nota-se que em ambas as zonas algumas das partículas deslocam-se na direção da corrente média à superfície. Em ambas as zonas e em ambos os períodos as direções predominantes das trajetórias são sul/sudoeste.



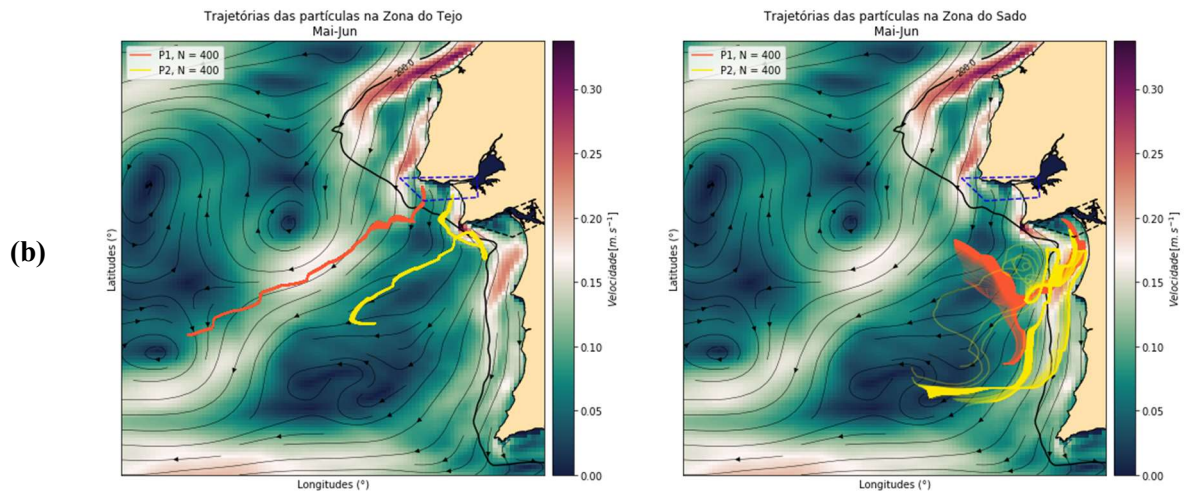
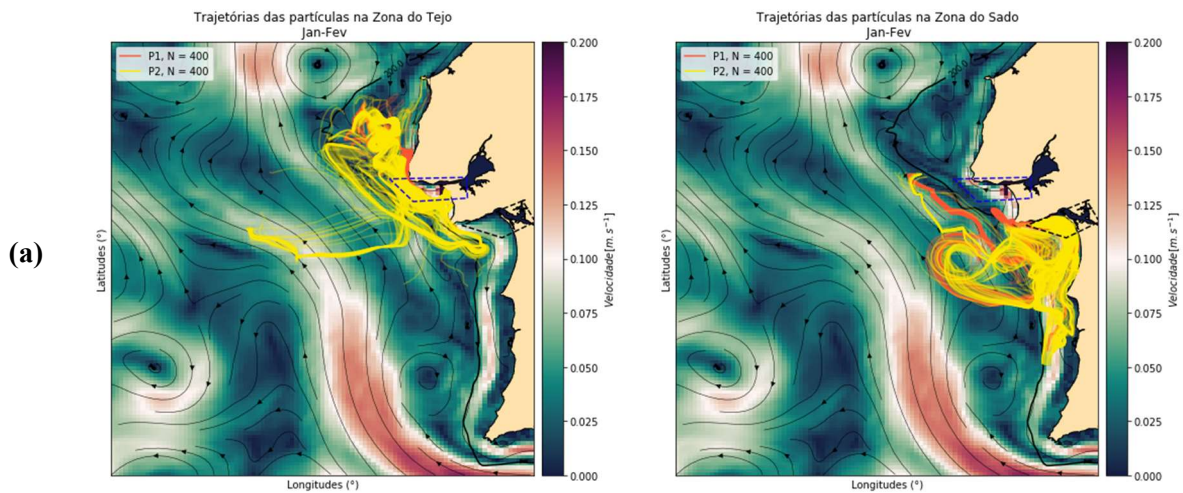


Figura 5.10. Trajetórias das partículas na zona do Tejo e na zona do Sado: (a) na passagem de inverno para primavera MA; (b) na passagem de primavera e verão MJ. As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.

No inverno JF (Figura 5.11(a)) e na passagem de outono/inverno ND (Figura 5.11(b)) na zona do Tejo não existe uma direção predominante, porque as direções variam muito. Enquanto que na zona do Sado, em ambos os períodos, as partículas tendem a dirigir-se para sul.



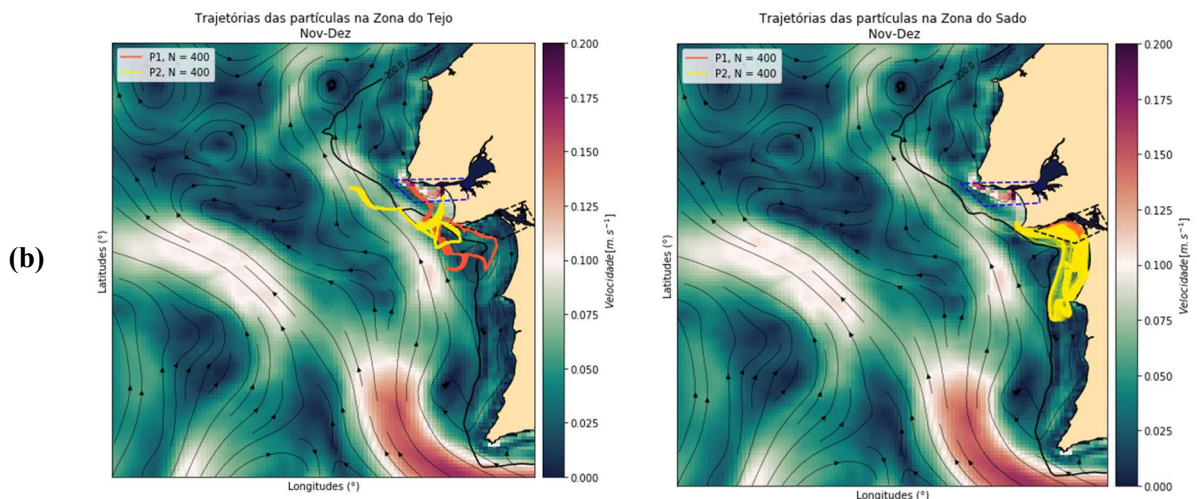


Figura 5.11. Trajetórias das partículas na zona do Tejo e na zona do Sado: (a) no inverno JF; (b) na passagem outono/inverno ND. As zonas coloridas representam o campo da velocidade da corrente média à superfície e as linhas a preto representam o campo de vetor da corrente média à superfície.

Para identificar as regiões em que as partículas flutuam e se acumulam utilizou-se a Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de acordo com os critérios geográficos (NUTS III) (Figura 5.12).



Figura 5.12. Limite das NUTS 2013. Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de acordo com os critérios geográficos (NUTS III). (site: <http://portugalglobal.pt/PT/InvestirPortugal/RegioesMultifacetadas/Paginas/RegioesMultifacetadas.aspx>).

Nos meses de verão JA na zona do Tejo (Figura 5.13(a)), as partículas deslocam-se para o oceano aberto, enquanto que na passagem de verão para outono SO (Figura 5.13(c)) as partículas que partem do ponto 1 deslocam-se junto à área Metropolitana de Lisboa (em Sesimbra) e as que partem do ponto 2 passam pelo Cabo Espichel e deslocam-se para sul perto do Alentejo Litoral (em Sines). Na zona do Sado em JA (Figura 5.13(b)) as partículas dirigem-se para sul perto da costa até perto do Algarve, enquanto que em SO (Figura 5.13(d)) as partículas passam junto da costa da região do Alentejo Litoral (Alcácer do Sal até à Costa Vicentina).

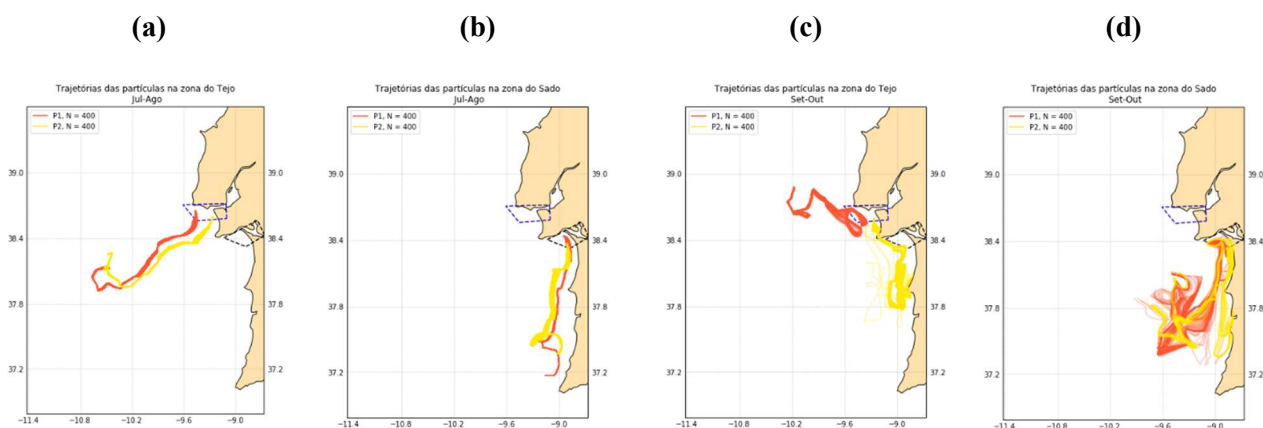


Figura 5.13. Representação das trajetórias das partículas nos meses de verão em JA: (a) zona do Tejo e (b) zona do Sado; na passagem de verão para outono em SO: (c) zona do Tejo e (d) zona do Sado, para o estudo das zonas de passagem das partículas durante os respetivos períodos.

Na zona do Tejo, na passagem de inverno para primavera MA (Figura 5.14(a)) as partículas durante alguns dias flutuam perto da costa área Metropolitana de Lisboa (em Cascais e Sesimbra), e posteriormente passam junto ao Cabo Espichel e dirigem-se para sul. Na passagem de primavera para verão MJ (Figura 5.14(c)) as partículas afastam-se do local de partida e não chegam a acumular-se na costa. Na zona do Sado em ambas as passagens (Figura 5.14(b) e (d)) as partículas flutuam junto à região do Alentejo Litoral (Alcácer do Sal até à Costa Vicentina), sendo que em MA inicialmente flutuam perto da costa da Arrábida.

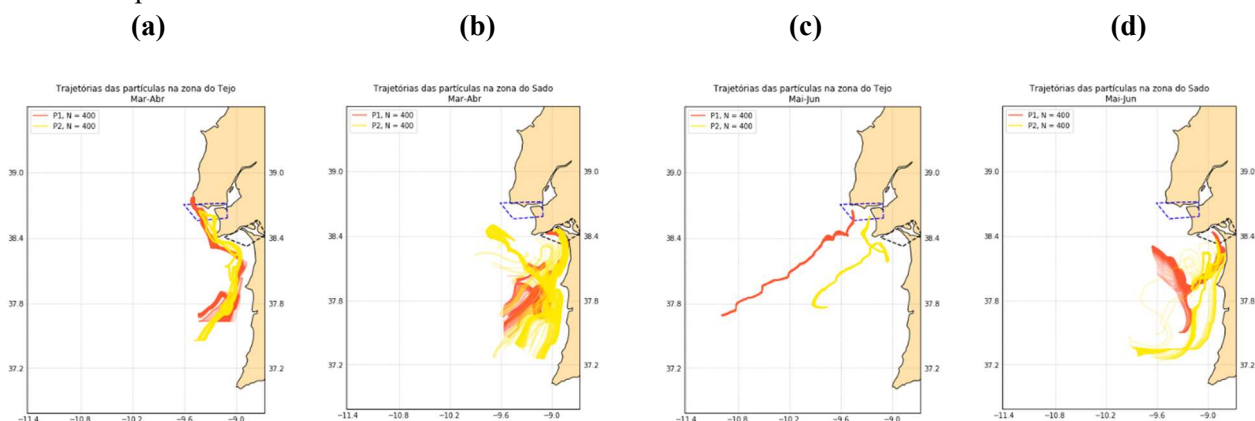


Figura 5.14. Representação das trajetórias das partículas na passagem de inverno para primavera MA: (a) zona do Tejo e (b) zona do Sado; na passagem de primavera para verão em MJ: (c) zona do Tejo e (d) zona do Sado, para o estudo das zonas de passagem das partículas durante os respetivos períodos.

Na zona do Tejo, no inverno JF (Figura 5.15(a)) e na passagem de outono/inverno ND (Figura 5.15(c)) as partículas flutuam junto à área Metropolitana de Lisboa, sendo que em JF flutuam especialmente nas zonas de Cascais, Sintra, Almada e Sesimbra e passam junto ao Cabo da Roca, e em ND flutuam essencialmente em Sesimbra. Na zona do Sado, em JF (Figura 5.15(b)) e em ND (Figura 5.15(d)) as partículas moveram-se perto da parte sul área Metropolitana de Lisboa (Cabo Espichel, Sesimbra e Arrábida) e do Alentejo Litoral (Alcácer do Sal até Sines), apesar de em JF algumas partículas estiveram perto da Costa Vicentina. No entanto, em ND observou-se que os percursos das partículas não tiveram grande variação, ou seja, mantiveram-se praticamente sempre perto das costas das zonas identificadas.

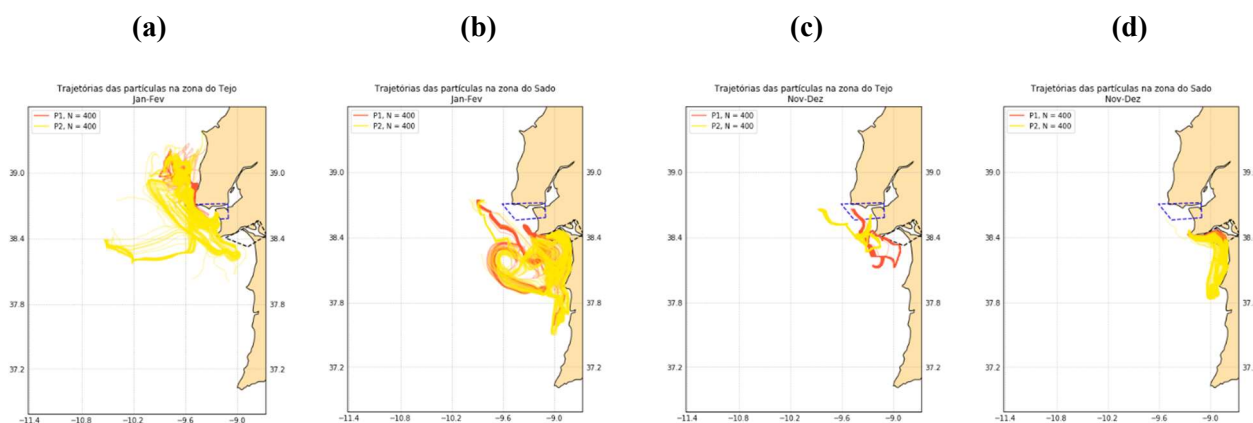


Figura 5.15. Representação das trajetórias das partículas nos meses de inverno em JF: **(a)** zona do Tejo e **(b)** zona do Sado; na passagem de outono para inverno em ND: **(c)** zona do Tejo e **(d)** zona do Sado, para o estudo das zonas de passagem das partículas durante os respetivos períodos.

Nesta secção, pode considerar-se que quando as partículas seguem geralmente a mesma direção que a corrente média à superfície, estas deverão também encontrar-se a flutuar na camada influenciada pelo vento. Nota-se que as trajetórias das partículas seguem a direção da corrente média à superfície nos meses de verão e na passagem de verão para outono. Contudo, as partículas que seguem a direção da corrente média à superfície podem estar a flutuar na camada superficial, quando deixam de seguir essa mesma corrente é porque provavelmente já não se encontra nessa camada.

Relativamente às regiões onde as partículas atravessam, as que iniciam o seu percurso na zona do Tejo tendem a navegar perto da área Metropolitana de Lisboa, especialmente em zonas de praia. No entanto, na passagem de primavera para verão (MJ) e nos meses de verão (JA), onde começa a maior atividade turística, as partículas não flutuam perto da costa, como se pode verificar na Figura 5.14(c) e na Figura 5.13(a). Na zona do Sado, as partículas tendem a navegar especialmente perto da região do Alentejo Litoral, mas no caso dos meses de verão JA (Figura 5.13(b)) as partículas dirigem-se para sul junto à costa chegando até ao Algarve.

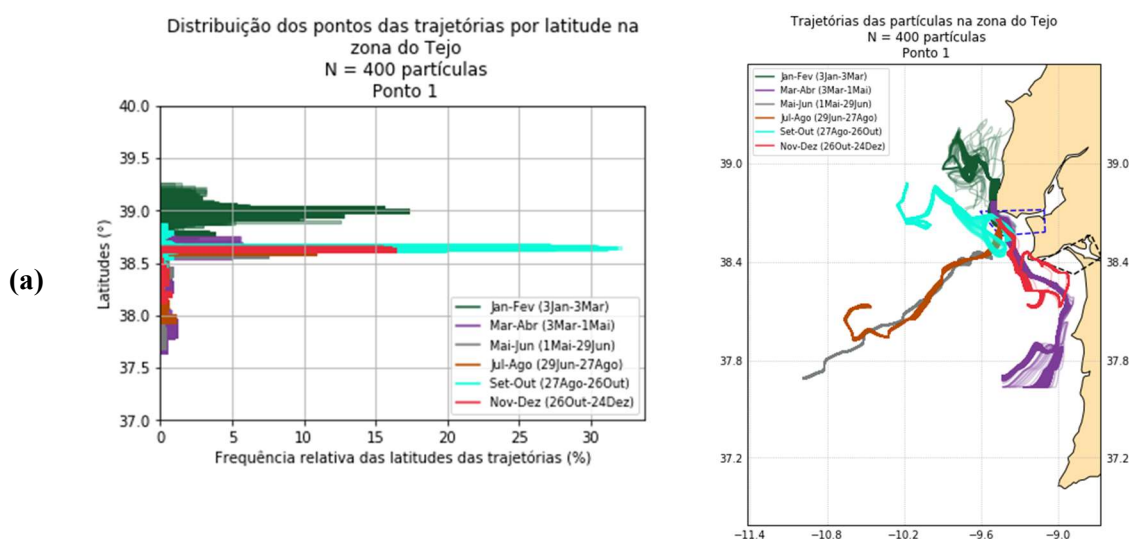
Todavia, é de notar que geralmente as partículas que partem da zona do Tejo no inverno (JF), na passagem de inverno para primavera (MA) e na passagem de verão para outono (SO), e algumas que partem da zona do Sado, na passagem de outono para inverno (ND) e no inverno (JF), passam junto ao Cabo Espichel. Por outro lado, geralmente partículas que partem da zona do Sado no período de SO passam junto à Costa Vicentina e nos períodos de MA, MJ e JA passam perto da Costa Vicentina.

É principalmente durante o verão que o fenómeno do upwelling ou afloramento costeiro ocorre na costa da Península Ibérica devido ao regime predominante de ventos do quadrante Norte, ou seja, quanto este sopra na direção Norte-Sul paralelamente à costa da PI promovendo a ascensão de águas frias e ricas em nutrientes. Verifica-se que durante o verão na zona do Sado as partículas tendem a dirigir-se para Sul. Sendo que durante o verão existe uma maior abundância de fitoplâncton, algumas destas partículas podem unir-se a esse fitoplâncton. Nesta altura, também existem outros padrões como plumas, jatos, vórtices e filamentos, associados a este fenómeno, onde as partículas também se podem acumular.

5.1.2 Distribuição dos pontos das trajetórias por latitude

Para estudar a distribuição dos pontos das trajetórias por latitude fez-se uma análise com base nos histogramas para identificar os picos para os seis períodos, ou seja, as latitudes onde as passagens das partículas foram mais frequentes para cada período bimensal.

Na zona do Tejo para o ponto 1 (Figura 5.16(a)), nos períodos de JF e de SO as partículas dirigem-se para norte/noroeste, nos períodos de MJ e de JA as partículas dirigem-se para sudoeste e nos períodos de MA e de ND as partículas dirigem-se para sul. Os períodos em que as partículas atingem o pico mais elevado da distribuição de pontos por latitude são SO, e seguidamente JF e ND. Em ambos os períodos, verifica-se que as partículas tendem a flutuar durante um determinado tempo perto da zona do Tejo, ou seja, ficam acumuladas nessa zona durante um tempo. No ponto 2 (Figura 5.16(b)), nos períodos de MJ e de JA dirigem-se para sudoeste, em ND dirigem-se para noroeste, em MA e SO dirigem-se para sul e em JF dirigem-se dentro do quadrante norte/noroeste. O período em que as partículas atingem o pico mais elevado da distribuição de pontos por latitude é ND, sendo que neste ponto a percentagem de partículas numa determinada zona é inferior à percentagem do ponto anterior. No entanto, em JF verifica-se que existe um maior conjunto de latitudes onde as partículas estão distribuídas.



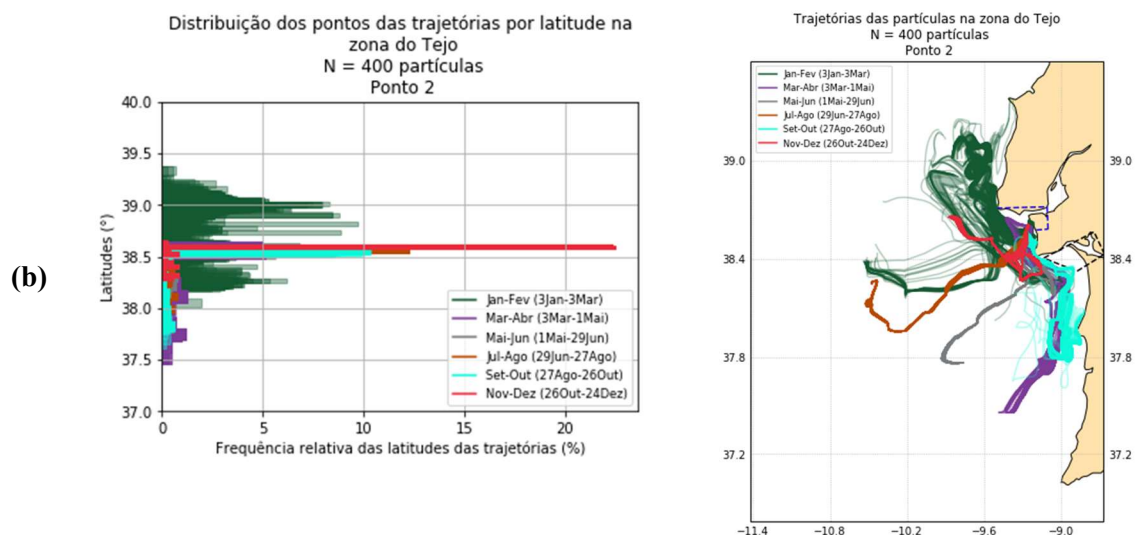
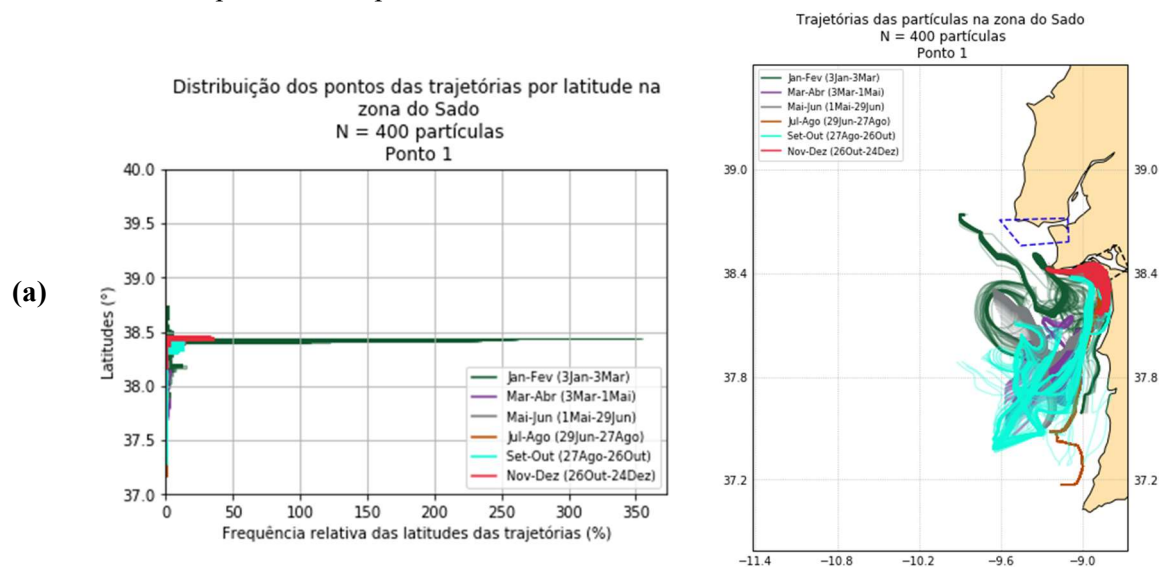


Figura 5.16. **Esquerda:** Distribuição dos pontos das trajetórias por latitude na zona do Tejo em todos os meses: **(a)** no ponto 1; **(b)** no ponto 2. **Direita:** Representação das trajetórias das partículas na zona do Tejo em todos os meses nos pontos 1 e 2.

Na zona do Sado para o ponto 1 (Figura 5.17(a)), em praticamente todos os períodos bimensais as partículas dirigem-se para sul, sendo que em JF existem partículas que se dirigem para noroeste. Verifica-se que em JF a percentagem do pico da distribuição de pontos por latitude é bastante elevada. Isto deve-se ao facto de as partículas terem permanecido junto à costa. No ponto 2 (Figura 5.17(b)), a direção predominante das partículas é sobretudo a mesma que a do ponto 1 para todos os meses. O pico mais elevado da distribuição de pontos por latitude é igualmente nos meses de JF, sendo que o valor é inferior comparado ao do ponto 1.



(b)

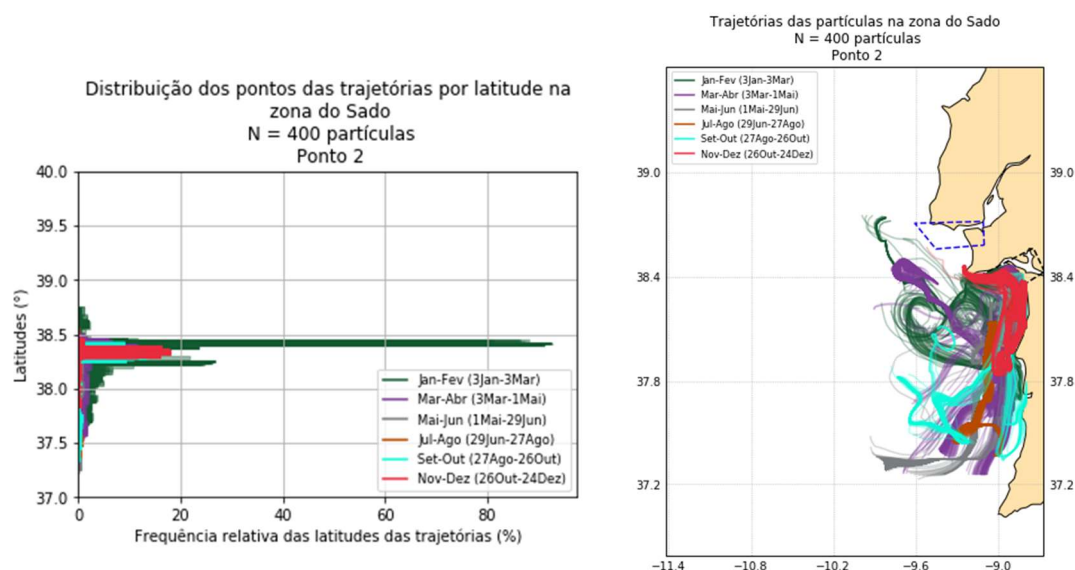


Figura 5.17. **Esquerda:** Distribuição dos pontos das trajetórias por latitude na zona do Sado em todos os meses: **(a)** no ponto 1; **(b)** no ponto 2. **Direita:** Representação das trajetórias das partículas na zona do Tejo em todos os meses nos pontos 1 e 2.

Na zona do Tejo as médias das latitudes no ponto 1 (Tabela 5.1(a)) encontram-se entre 38,42° e 38,92°, no ponto 2 (Tabela 5.1(b)) encontram-se entre 38,35° e 38,77°. Essas latitudes correspondem às latitudes da área Metropolitana de Lisboa.

Tabela 5.1. Média da distribuição dos pontos das trajetórias por latitude na zona do Tejo para todos os meses nos dois conjuntos de partículas que inicializaram: **(a)** no ponto 1; **(b)** no ponto 2.

(a)

Média da distribuição dos pontos das trajetórias por latitude	
ZONA DO TEJO - PONTO 1	
Meses	Médias das Latitudes (°)
Jan-Fev	38,92
Mar-Abr	38,42
Mai-Jun	38,49
Jul-Ago	38,54
Set-Out	38,66
Nov-Dez	38,60

(b)

Média da distribuição dos pontos das trajetórias por latitude	
ZONA DO TEJO - PONTO 2	
Meses	Médias das Latitudes (°)
Jan-Fev	38,77
Mar-Abr	38,35
Mai-Jun	38,46
Jul-Ago	38,50
Set-Out	38,50
Nov-Dez	38,57

Na zona do Sado as médias das latitudes no ponto 1 (Tabela 5.2(a)) encontram-se entre 38,23° e 38,43°, no ponto 2 (Tabela 5.2(b)) encontram-se entre 38,21° e 38,32°. Essas latitudes correspondem à parte sul da área metropolitana de Lisboa e à região do Alentejo Litoral. Nota-se que nos períodos de MA, MJ e SO as partículas flutuam em praticamente toda a costa do Alentejo Litoral ou a sul do paralelo 38,4 °N.

Tabela 5.2. Média da distribuição dos pontos das trajetórias por latitude na zona do Sado para todos os meses nos dois conjuntos de partículas que inicializaram: (a) no ponto 1; (b) no ponto 2.

(a)

Média da distribuição dos pontos das trajetórias por latitude	
ZONA DO SADO - PONTO 1	
Meses	Médias das Latitudes (°)
Jan-Fev	38,39
Mar-Abr	38,23
Mai-Jun	38,34
Jul-Ago	38,27
Set-Out	38,31
Nov-Dez	38,43

(b)

Média da distribuição dos pontos das trajetórias por latitude	
ZONA DO SADO - PONTO 2	
Meses	Médias das Latitudes (°)
Jan-Fev	38,26
Mar-Abr	38,22
Mai-Jun	38,21
Jul-Ago	38,22
Set-Out	38,24
Nov-Dez	38,32

5.1.3 Distância de dispersão/acumulação nas zonas do Tejo e do Sado

A distância de dispersão/acumulação é a distância do seu ponto de inicialização até ao ponto onde as partículas se dispersam ou se acumulam ao fim do período de análise, que neste caso foi ao fim dos 60 dias.

No final do período de JF na zona do Tejo (Figura 5.18(a)), as partículas acumulam-se a noroeste e na zona do Sado (Figura 5.18(b)) as partículas encontram-se mais dispersas entre elas, no entanto, algumas permanecem acumuladas na zona Metropolitana de Lisboa. Nota-se que algumas partículas que partiram da zona do Sado acumulam-se num local perto da zona delimitada para Sado, onde pode-se verificar uns pequenos vórtices (Figura 5.18(c)) e que outras partículas se acumulam perto da região do Alentejo Litoral, principalmente perto de Sines e da Costa Vicentina.

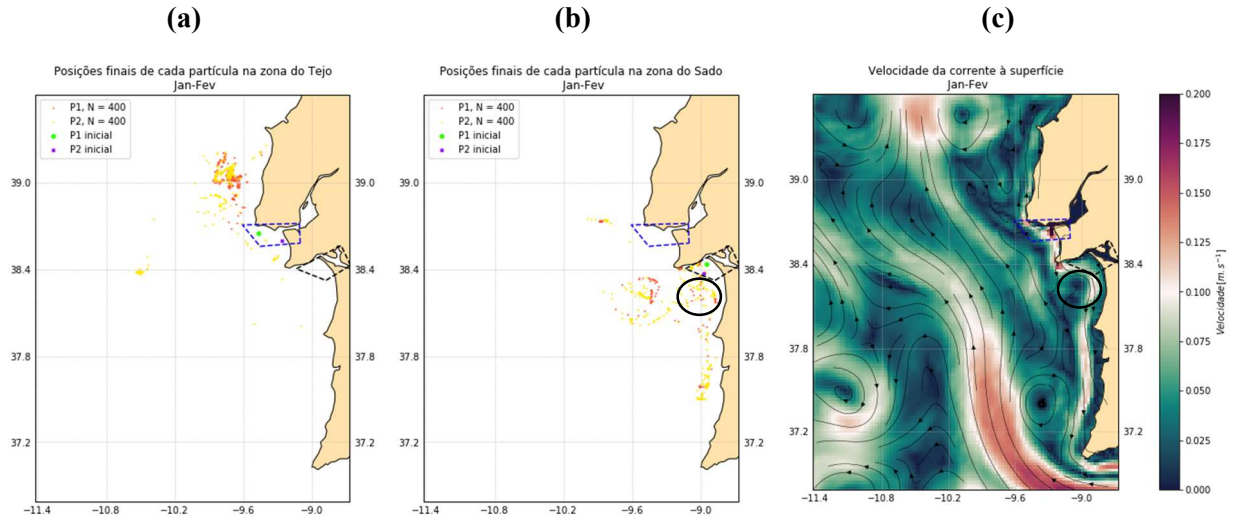


Figura 5.18. Representação das posições finais de cada partícula em janeiro e fevereiro (JF): **(a)** na zona do Tejo; **(b)** na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. **(c)**: Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para JF. **Círculos a preto em (b) e (c)**: Representação do local de acumulação das partículas em (b) que corresponde a um local onde se verifica uns pequenos vórtices em (c).

No final do período de MA na zona do Tejo (Figura 5.19(a)), em ambos os pontos as partículas possuíram praticamente a mesma trajetória e os pontos de acumulação situam-se a sul paralelamente ao Alentejo Litoral e também um pouco da região do Algarve. Isto deve-se ao facto dessas partículas terem casualmente percorrido trajetórias paralelas à mesma velocidade até ao final da simulação. Na zona do Sado (Figura 5.19(b)), as partículas permaneceram-se mais dispersas, sendo que algumas permaneceram perto da Costa Vicentina.

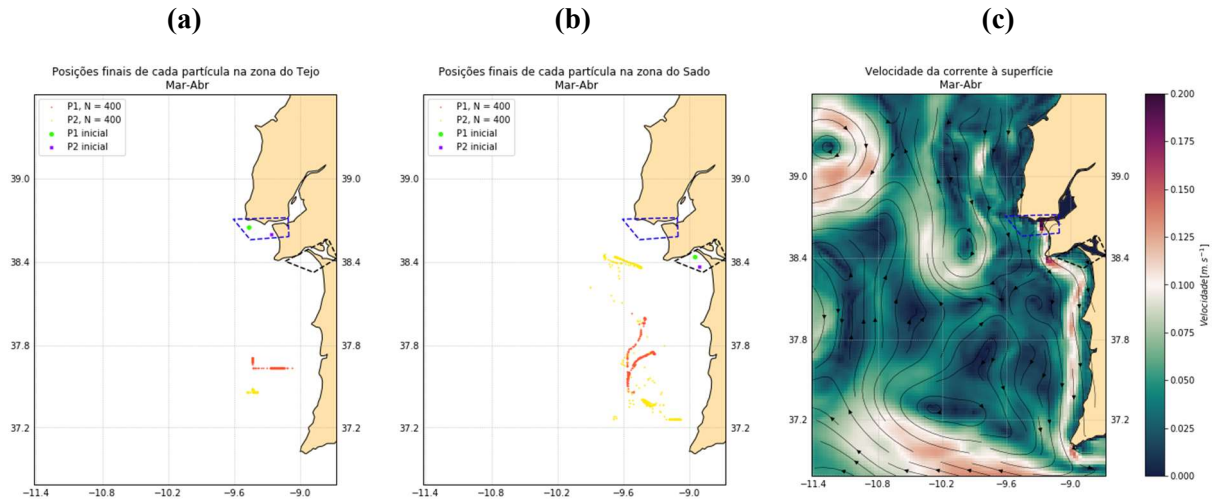


Figura 5.19. Representação das posições finais de cada partícula em março e abril (MA): **(a)** na zona do Tejo; **(b)** na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. **(c)**: Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para MA.

Em MJ na zona do Tejo (Figura 5.20(a)) verificou-se que, em ambos os pontos, as partículas possuem trajetórias praticamente semelhantes, isto é, os locais de acumulação dessas partículas no final do período são o mesmo. Verifica-se que os locais de acumulação das partículas são representados por um ponto (locais assinalados com círculos pretos). Na zona do Sado (Figura 5.20(b)) no final do período de MJ as partículas ficaram mais dispersas umas das outras.

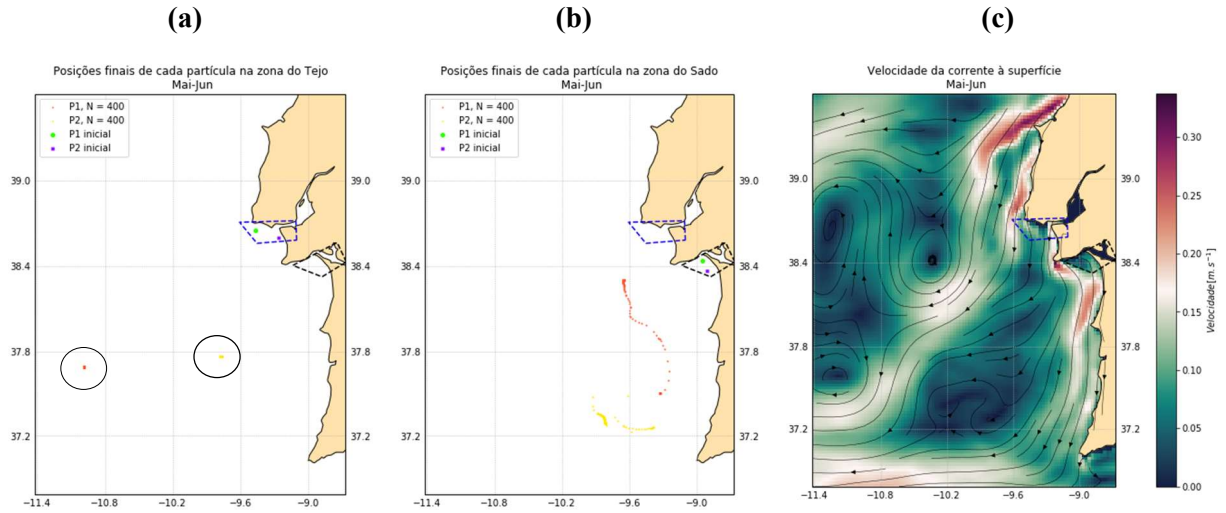


Figura 5.20. Representação das posições finais de cada partícula em maio e junho (MJ): (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. (c): Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para MJ. **Círculos a preto:** Indicação dos locais de acumulação das partículas no final do período MJ que partiram dos pontos 1 e 2.

Na zona do Tejo no final do período de JA (Figura 5.21(a)), verifica-se que os locais de acumulação das partículas estão representados por um ponto (local assinalado com círculo preto), e que se localizam num sistema de correntes que formam um vórtice (Figura 5.21(c)). Na zona do Sado (Figura 5.21(b)), os locais de acumulação também estão representados por um ponto (local assinalado com círculos preto), para o conjunto de partículas que inicializou no ponto 1 e para o conjunto de partículas que inicializou no ponto 2. Dos conjuntos de partículas que inicializaram o seu percurso na zona do Sado, verifica-se que as suas localizações finais ficam perto das regiões do Alentejo Litoral e Costa Vicentina (Figura 5.21(b)).

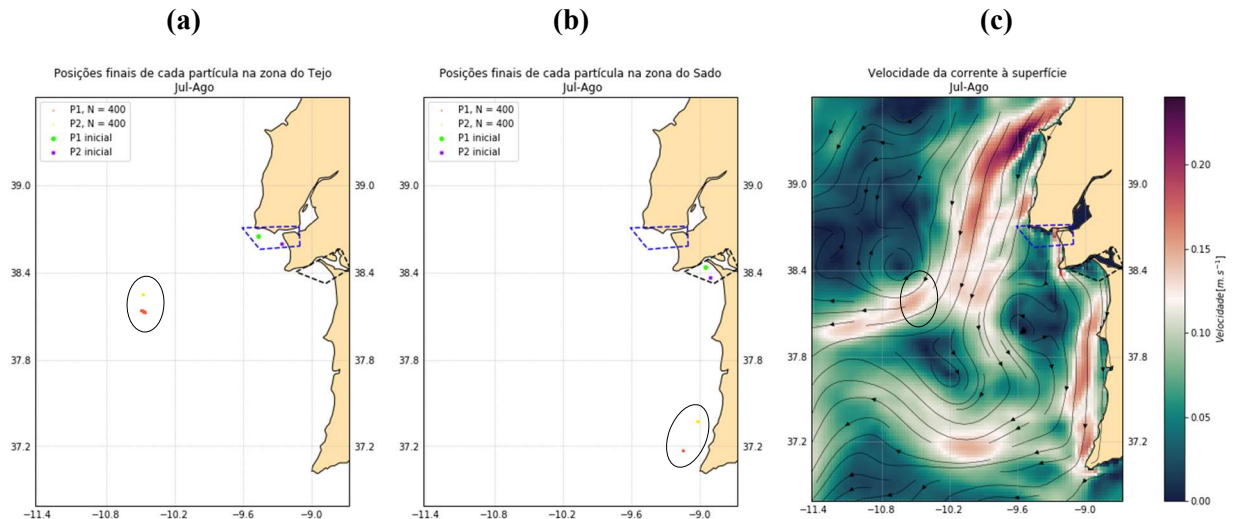


Figura 5.21. Representação das posições finais de cada partícula em julho e agosto (JA): (a) na zona do Tejo; (b) na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. (c): Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para JA. **Círculos a preto em (a) e (b):** Indicação dos locais de acumulação das partículas no final do período JA que partiram dos pontos 1 e 2. **Círculo a preto em (c):** Indica o local de um sistema de correntes que formam um vórtice que corresponde ao local de acumulação das partículas em (a).

Na zona do Tejo em SO (Figura 5.22(a)), verificou-se que as trajetórias do conjunto de partículas que inicializou no ponto 1 têm direções opostas ao conjunto que inicializou no ponto 2. As partículas do

ponto 1 acumulam-se num ponto a noroeste, enquanto que algumas das partículas do ponto 2 acumulam-se na região do Alentejo Litoral (locais assinalados com círculos pretos). As partículas que inicializaram na zona do Sado (Figura 5.22(b)) acumulam-se num local onde existem pequenos vórtices (Figura 5.22(c)), e algumas partículas acumulam-se em Sines.

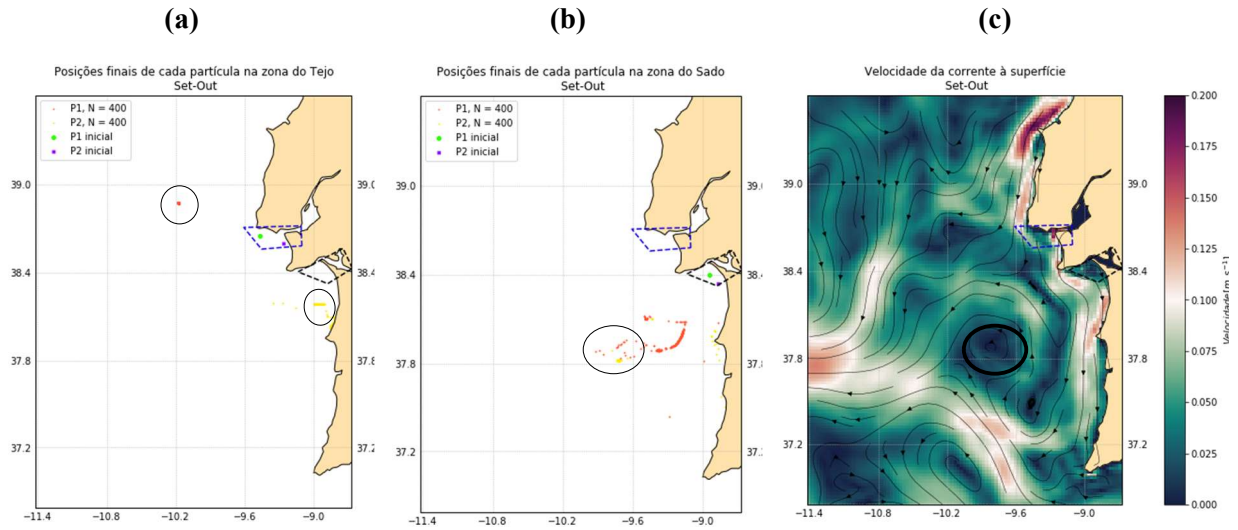


Figura 5.22. Representação das posições finais de cada partícula em setembro e outubro (SO): **(a)** na zona do Tejo; **(b)** na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. **(c)**: Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para SO. **Círculos a preto em (a)**: Indicação dos locais de acumulação das partículas no final do período SO que partiram dos pontos 1 e 2. **Círculos preto em (b) e (c)**: Representação do local de acumulação das partículas em (b) que corresponde a um local onde se verifica um sistema de correntes que formam um vórtice em (c).

Em ND na zona do Tejo (Figura 5.23(a)), verificou-se que as partículas que inicializaram no ponto 1 tiveram trajetórias semelhantes, sendo assim, o local de acumulação no final do período foi praticamente o mesmo e encontram-se perto da zona delimitada. No entanto, para o ponto 2 apesar das partículas também terem trajetórias semelhantes, acabaram por se acumular mais a norte. Na zona do Sado (Figura 5.23(b)) no final do período, as partículas acumulam-se principalmente junto ao Cabo Espichel, a Sesimbra e dentro da área delimitada para a zona do Sado.

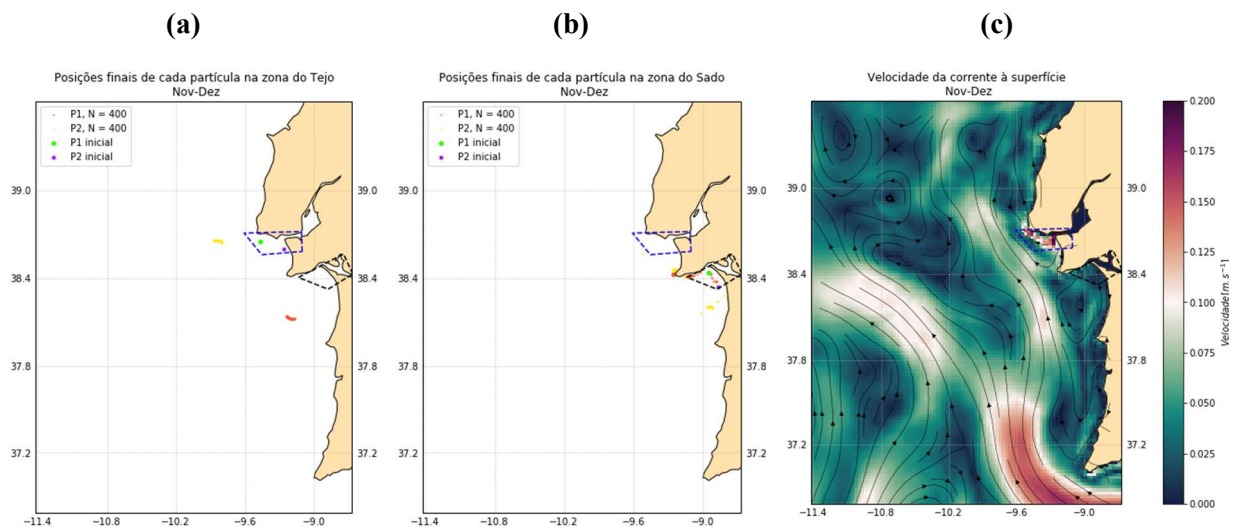


Figura 5.23. Representação das posições finais de cada partícula em novembro e dezembro (ND): **(a)** na zona do Tejo; **(b)** na zona do Sado. Zonas de acumulação e dispersão das partículas. **(c)**: Representação do campo de velocidade da corrente média à superfície para ND.

Conclui-se que para as partículas que iniciam a sua trajetória na zona do Tejo praticamente não existe locais de acumulação junto à costa, no entanto, no final de quase todos os períodos as trajetórias das partículas num determinado ponto ou local, ou seja, apesar das partículas não partirem todas ao mesmo tempo estas percorrem um trajeto muito semelhante e acabam por se acumular no mesmo local no final dos períodos. Comparativamente às partículas que iniciam na zona do Sado, estas tendem a permanecerem mais dispersas, e também tendem a ficar mais próximas da costa. Verifica-se que as partículas que iniciam a suas trajetórias em ambas as zonas, por vezes também se acumulam em zonas onde existem vórtices.

Apesar de algumas partículas que partiram da zona do Tejo nos períodos JF, MA e SO, e de algumas que partiram da zona do Sado nos períodos de JF e ND terem passado junto ao Cabo Espichel, apenas se verificou a acumulação de partículas junto ao Cabo Espichel na zona do Sado e no final dos períodos JF e ND. Isto não significa que nos restantes períodos algumas dessas partículas não se tenham também acumulado nesta zona, uma vez que sabemos que o plástico se degrada ao longo do tempo, é ingerido por seres vivos e é acumulado nas costas/praias, bem como no fundo do mar. Todavia, estes locais de acumulação podem não ser sempre à superfície, visto que neste estudo não é especificado o tipo de partícula.

Para saber qual o deslocamento de uma partícula ao longo de um dado período, calculou-se a distância entre o ponto de lançamento de uma dada partícula e o ponto final da sua trajetória. A distância média de dispersão/acumulação é a média de todos os deslocamentos em cada período.

Calculou-se também o desvio-padrão das distâncias para avaliar o índice de dispersão das trajetórias de um dado conjunto de partículas em relação à distância média. O mesmo procedimento foi feito para os pontos 1 e 2 em cada zona e para todos os períodos.

Na Tabela 5.3 está representada a distância média de dispersão/acumulação em quilómetro em cada um dos períodos na zona do Tejo. O período onde a distância média de dispersão/acumulação é menor é ND, enquanto que o período que tem um maior valor é MJ. Também estão representados os valores do desvio-padrão das distâncias na zona do Tejo, onde o período que apresenta desvio-padrão mais elevados é JF, e o período de JA apresenta valores de desvio-padrão mais baixos. Isto significa, que nos meses de inverno (JF) existe uma maior dispersão de partículas. Nota-se que entre o ponto 1 e o ponto 2 do período de SO existe uma discrepância nos valores do desvio-padrão das partículas com origem no ponto 2.

Tabela 5.3. Distância Média de dispersão/acumulação das trajetórias das partículas em quilômetro (km) na zona do Tejo, em cada período para cada ponto de lançamento. A coluna da Média das médias representa a distância média entre a média do ponto 1 a do ponto 2. Desvio-Padrão da dispersão/acumulação das distâncias das trajetórias das partículas na zona do Tejo.

Zona do Tejo – Distância Média de dispersão/acumulação (km)				Desvio-Padrão (km)	
	Ponto 1	Ponto 2	Média das médias	Ponto 1	Ponto 2
Jan-Fev	46,2	69,0	57,6	7,52	19,54
Mar-Abr	110,0	126,9	118,5	4,53	0,60
Mai-Jun	170,8	102,4	136,6	0,21	0,13
Jul-Ago	105,4	112,4	108,9	0,47	0,02
Set-Out	66,8	59,7	63,3	0,26	10,25
Nov-Dez	61,7	51,0	56,3	1,77	2,26

Na Tabela 5.4 está representada a distância média de dispersão/acumulação em quilômetro em cada um dos períodos na zona do Sado. O período onde a distância média de dispersão/acumulação é menor é ND, enquanto que JA apresenta os maiores valores para ambos os pontos. O período que tem o maior valor no ponto 2 é MJ. Também estão representados os valores do desvio-padrão na zona do Sado, onde o período que apresenta o desvio-padrão mais elevado é JF, e o período JA apresenta valores mais baixos de desvio-padrão, semelhante ao que acontece na zona do Tejo. Isto significa, que nos meses de inverno (JF) terá ocorrido uma maior dispersão de partículas.

Tabela 5.4. Distância Média de dispersão/acumulação das trajetórias das partículas em quilômetro (km) na zona do Sado, em cada período para cada ponto de lançamento. A coluna da Média das médias representa a distância média entre a média do ponto 1 a do ponto 2. Desvio-Padrão da dispersão/acumulação das distâncias das trajetórias das partículas na zona do Sado.

Zona do Sado – Distância Média de dispersão/acumulação (km)				Desvio Padrão (km)	
	Ponto 1	Ponto 2	Média das médias	Ponto 1	Ponto 2
Jan-Fev	50,6	49,3	50,0	33,72	32,52
Mar-Abr	92,6	93,4	93,0	15,28	30,22
Mai-Jun	72,7	142,6	107,7	18,33	2,97
Jul-Ago	142,0	111,5	126,7	0,00	0,02
Set-Out	56,8	92,6	74,7	10,20	10,12
Nov-Dez	17,9	32,6	25,2	5,86	7,90

Para ambas as zonas, os períodos onde as partículas apresentam uma distância média de dispersão/acumulação mais elevada correspondem à passagem de inverno para primavera (MA), à passagem de primavera para verão (MJ) e nos meses de verão (JA). Os períodos que apresentam um valor mais baixo correspondem a passagem de outono para inverno (ND). Isto significa que, especialmente, no final da primavera e no verão as partículas tendem a afastarem-se mais do seu ponto inicial, enquanto que no início do inverno as partículas tendem a ficar mais perto do ponto de partida. Contudo, durante os meses de inverno (JF), existe uma maior variabilidade na distribuição de partículas em ambas as zonas.

6 Conclusões

Foi utilizado o modelo LTRANS para simular as trajetórias de partículas passivas em três dimensões. O LTRANS é um modelo de trajetórias de partículas off-line, o qual foi executado a partir de previsões do modelo numérico oceânico ROMS. Foi simulado o período de 3 de janeiro de 1991 a 2 de janeiro de 1992 para duas zonas definidas: uma no estuário do Tejo e outra no estuário do Sado; e cada zona teve dois pontos de lançamento: P1 e P2. As simulações foram executadas a partir de uma ligação remota a um servidor da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Cada simulação de um período de dois meses para um dado ponto, teve duração de cerca de 60 minutos. Ao todo foram realizadas 24 simulações.

Em todos os períodos, a direção predominante das trajetórias das partículas que partiram da zona do Sado foi de sul/sudoeste, por outro lado quando partiram da zona do Tejo verifica-se uma maior variação na direção. Nota-se que em ambas as zonas algumas partículas tendem a seguir a mesma direção que a corrente média à superfície, sugerindo que as partículas deverão estar a flutuar na camada superficial, ou seja, na camada que é influenciada pelo vento. Isto porque estamos a considerar que as partículas possuem o mesmo comportamento do escoamento de um elemento de fluido.

Geralmente, as partículas que partiram da zona do Tejo tendem a flutuar perto da costa da área Metropolitana de Lisboa, mas nunca chegaram a entrar na área delimitada para a zona do Sado. Na zona do Sado, as partículas tendem a flutuar perto da costa sul da área Metropolitana de Lisboa e especialmente perto da região do Alentejo Litoral. No entanto, quando existe uma maior atividade turística na zona do Tejo, ou seja, no fim da primavera e durante o verão, as partículas tendem a dirigir-se para o oceano aberto. Nota-se que apesar da maioria das partículas que partiram da zona do Sado se tenham dirigido para sul, algumas chegaram a flutuar perto do Cabo Espichel, no fim do outono e durante o inverno. Em praticamente em quase todos os períodos de JF a JA, as partículas que partiram da zona do Sado tiveram pontos de acumulação perto ou até junto da Costa Vicentina.

Durante o verão as partículas, principalmente as que partiram da zona do Sado, se dirigiram para sul porque é a época do upwelling (afioramento costeiro) quando existe uma maior abundância de fitoplâncton. Nesta altura, muitas partículas ficam coladas ao fitoplâncton e os animais marinhos que se alimentam desse fitoplâncton podem morrer ou serem pescados e ingeridos pelos humanos. Como nesta altura a atividade turística aumenta, existe uma maior abundância de partículas na região do Alentejo Litoral. No verão, também se pode encontrar partículas em plumas, jatos, vórtices e filamentos que estão associados ao upwelling.

No inverno, as partículas tendem a acumular-se geralmente perto dos locais de onde partiram, no entanto, as áreas de acumulação estão mais espalhadas porque existe uma maior dispersão das trajetórias. Essa dispersão é geralmente direcionada para Norte devido a circulação oceânica predominante.

No final de quase todos os períodos, as partículas que partiram da zona do Tejo não tendem a acumular-se junto à costa, mas efetuam um percurso semelhante, acumulando-se no mesmo local. Comparativamente às partículas que partem da zona do Sado, os locais de acumulação tendem a ficar mais dispersos e juntos à costa e em zonas onde existem vórtices. Mais uma vez, existe uma maior acumulação e dispersão de partículas na região do Alentejo Litoral.

Para ambas as zonas, as partículas tendem a ficar mais longe do ponto de partida no final da primavera e no verão. Nessa altura na zona do Sado, os pontos de acumulação ficam mais dispersos e mais longe dos seus pontos de origem, mas encontram-se mais perto da costa comparativamente aos pontos que partem da zona do Tejo, que normalmente se dirigem para o oceano aberto, enquanto que no final do outono e no inverno as partículas tendem a ficar acumuladas perto ou junto do ponto de origem, principalmente quando partem da zona do Sado.

Segundo o estudo de Frias et al. (2014), as regiões com maiores valores de concentrações e de abundâncias de microplásticos, em proporções de zooplâncton, são na Costa Vicentina e em Lisboa. No caso da Costa Vicentina, estes valores estão provavelmente relacionados com a proximidade a indústrias e a instalações portuárias em Sines. No caso de Lisboa, estes resultados estarão associados às elevadas densidades populacionais e às descargas provenientes dos rios Tejo e Sado. No entanto, os resultados apresentados neste trabalho mostram que muitas das partículas que partiram da zona do Sado podem também chegar à Costa Vicentina, e possivelmente contribuir para as concentrações de microplásticos nessa região.

O estudo de Antunes et al. (2018), mostrou que geralmente no inverno/outono existe uma maior concentração de MP, devido ao facto de estas estações estarem associadas a episódios característicos de elevada precipitação e de tempestades, que facilmente transportam o MP para as águas costeiras. Os resultados obtidos neste trabalho são consistentes com aquele estudo, confirmando que as partículas ficaram acumuladas junto à costa, principalmente no inverno.

Apesar deste trabalho ter sido realizado apenas com dados de 1991, o objetivo foi conjugar técnicas de modelação para estudar a evolução da concentração/dispersão de partículas, neste caso plásticos, à escala da zona da Margem Continental Portuguesa, para posteriormente conhecer o comportamento da distribuição da sua concentração e relacionar com estudos sobre concentrações de resíduos marinhos na costa Portuguesa.

7 Referências

- Ansong, J. K. (2016). Ocean Modeling. University of Ghana/Michigan. Acedido a 19 de novembro de 2019, em https://coessing.files.wordpress.com/2016/08/ocean_modeling_joseph.pdf.
- Antunes, J., Frias, J., & Sobral, P. (2018). Microplastic on the Portuguese coast. *Marine Pollution Bulletin*. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.04.025.
- Associação Natureza Portugal (ANP) em associação com World Wildlife Fund (WWF). X-RAY da Poluição por Plástico: Repensar o Plástico em Portugal. Relatório de Setembro de 2019. Obtido em https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/plasticos__6_.pdf.
- Agência Portuguesa do Ambiente - APA (2017). Programa de Monitorização do Lixo Marinho em praias. Obtido em https://apambiente.pt/_zdata/Instrumentos/Lixo%20Marinho/Relatrio%20Lixo%20Marinho%202017.pdf.
- Borges, M. F., Cabral, H., Andrade, F. (2009). Oceano. Pereira, H. M., Domingos, T., Vicente, L., Proença, V. (Editores). *Ecosistemas e Bem-Estar Humano: Avaliação para Portugal do Millennium Ecosystem Assessment*. Cap.13, pp. 437-461. Disponível em https://www.cienciaviva.pt/img/upload/Capitulo_13.pdf
- Cardoso, A. C. (2008). Alguns Aspectos da modelação ecológica na costa portuguesa (Aveiro) - Efeitos físicos na distribuição de nutrientes e biomassa fitoplanctónica. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Física - Universidade de Aveiro.
- Cózar, A., Sanz-Martín, M., Martí, E., González-Gordillo, J. I., Ubeda, B., Gálvez, J. Á., . . . Duarte, C. M. (1 de abril de 2015). Plastic Accumulation in the Mediterranean Sea. (E. V. Thuesen, Ed.) *PLoS ONE*. doi:10.1371/journal.pone.0121762. Obtido de <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0121762>.
- Curchitser, E., & Turuncoglu, U. (2015). ROMS (Regional Ocean Modeling System): Tutorial. School on Ocean Climate Modeling: Physical and Biogeochemical Dynamics of Semi-Enclosed Seas. Acedido a 18 de novembro de 2019, em <http://indico.ictp.it/event/a14262/session/12/contribution/64/material/slides/1.pdf>.
- Dias, E. D. (2015). A circulação oceânica costeira de Portugal. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha - Escola Naval. Obtido de <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/11263/1/ASPOF%20M%20Costa%20Dias%202015.pdf>
- Fiúza, A. F. (1980). *Teorias Clássicas da Circulação dos Oceanos*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Fiúza, A. F., Macedo, M. E., & Guerreiro, M. R. (1982). Climatological space and time variation of the Portuguese coastal upwelling. *Acta Oceanológica*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 5º Volume. Obtido de <https://archimer.ifremer.fr/doc/00120/23169/21014.pdf>.
- Forecasts, W. (2016). Coastal Oceanography. The University of Western Australia. Acedido a 18 de novembro de 2019, em <https://anfog.ecm.uwa.edu.au/Model/info.php>.
- Frias, J. P. G. L., Otero, V., Sobral, P. (2014). Evidence of microplastics in samples of zooplankton from Portuguese coastal waters. *Marine Environmental Research*. ISSN 01411136. 95:2014) 89–95. doi: 10.1016/j.marenvres.2014.01.001.
- Galgani, F., Hanke, G., & Maes, T. (2015). Abiotic Aspects of Marine Litter Pollution: Global Distribution, Composition and Abundance of Marine Litter. Em B. Melanie, L. Gutow, & M. Klages, *Marine Anthropogenic Litter*. Cap. 2, pp. 29-57. doi:10.1007/978-3-319-16510-3.
- Hammer, J., Kraak, M. H. S. & Parsons, J. R. (2012). Plastic in the Marine Environment: The Dark Side of Modern Gift. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. doi: 10.1007/978-1-4614-3414-6_1. Obtido em

- https://www.researchgate.net/publication/225049699_Plastics_in_the_Marine_Environment_The_Dark_Side_of_a_Modern_Gift.
- Hurduc, A. (2018). Hidrologia e Dinâmica do Oceano Costeiro de Portugal na Região do Cabo Mondego. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências do Mar. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Obtido em https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/35534/1/ulfc121882_tm_Alexandra_Hurduc.pdf
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox C., ... Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science: Marine Pollution*. Obtido em https://www.iswa.org/fileadmin/user_upload/Calendar_2011_03_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71_2_.pdf.
- Keene State College. Map Polygon/Polyline Tool. Obtido em <https://www.keene.edu/campus/maps/tool/>
- Koii, M., Van Nes, E., Scheffer, M., & Koelmans, A. (2017). Ups and Downs in the Ocean: Effects of Biofouling on Vertical Transport of Microplastics. *Environmental Science and Technology*. doi: 10.1021/acs.est.6b04702.
- Kukulka, T., Proskurowski, G., Morét-Ferguson, S., Meyer, D. W., & Law, K. L. (2012). The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris. *Geophysical Research Letters*, 39. doi:10.1029/2012GL051116.
- Lopes, F. M. (2012). Upwelling na costa Atlântica da Península Ibérica: análise de uma simulação regional de clima. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geofísicas, com especialização em Meteorologia - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Martins, J., & Sobral, P. (2011). Plastic marine debris on the Portuguese coastline: A matter of size? doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.028.
- Mellor, G. L., Håkkinen, A. M., Ezer, T., & Patchen, R. C. (2002). A Generalization of a Sigma Coordinate Ocean Model and an Intercomparison of Model Vertical Grids. Em: Pinardi, N., Woods, J. (eds), *Ocean Forecasting* (Cap.4, pp. 55-72). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Myroms.org. Regional Ocean Modeling System. Acedido a 18 de Novembro de 2019, em <https://www.myroms.org/>.
- NOAA (National Centers for Environmental information). Bathymetric Data Viewer. Obtido em <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/bathymetry/>.
- Raphaldini, B., Raupp, C. F., & Dias, P. L. (2017a). Modelos da Dinâmica de Fluidos Geofísicos - Introdução Matemática à Dinâmica de Fluidos Geofísicos - 31º Colóquio Brasileiro de Matemática. Associação Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada (IMPA), Brasil, pp. 47-80. Obtido de https://impa.br/wp-content/uploads/2017/08/31CBM_05.pdf.
- Raphaldini, B., Raupp, C. F., D., & Dias, P. L. (2017b). Equações do movimento - Introdução Matemática à Dinâmica de Fluidos Geofísicos - 31º Colóquio Brasileiro de Matemática. Associação Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada (IMPA), Brasil, pp. 23-47. Obtido de https://impa.br/wp-content/uploads/2017/08/31CBM_05.pdf.
- Reisser, J., Slat, B., Noble, K., Plessis, K., Epp, M., Proietti, M., . . . Pattiaratchi, C. (2015). The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre. *Biogeosciences*. doi:10.5194/bg-12-1249-2015. Obtido de <https://www.biogeosciences.net/12/1249/2015/>.
- Ryan, P. G. (2015). A Brief History of Marine Litter Research. Em B. Melanie, L. Gutow, & M. Klages (Edits.), *Marine Anthropogenic Litter*. Cap. 1, pp. 1-29. doi:10.1007/978-3-319-16510-3.
- Sá, S., Bastos-Santos, J., Araújo, H., Ferreira, M., Duro, V., Alves, F., . . . Vingada, J. (2016). Spatial distribution of buoyant plastic debris. *Marine Pollution Bulletin*. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.01.011

- Schlag, Z. R., & North, E. W. (2012). Overview. Em Lagrangian TRANSport model (LTRANS v.2) User's Guide (Cap.I, pp. 1-12). University of Maryland Center for Environmental Science, Horn Point Laboratory, Cambridge. Obtido de https://northweb.hpl.umces.edu/LTRANS/LTRANS-v2/LTRANSv2_UsersGuide_6Jan12.pdf.
- Schlag, Z. R., & North, E. W. (6 de Janeiro de 2012). Behavior Module. Em Lagrangian TRANSport model (LTRANS v.2) User's Guide (Cap. VI, pp. 55-73). University of Maryland Center for Environmental Science, Horn Point Laboratory, Cambridge. Obtido de https://northweb.hpl.umces.edu/LTRANS/LTRANS-v2/LTRANSv2_UsersGuide_6Jan12.pdf.
- Schlag, Z. R., & North, E. W. (6 de Janeiro de 2012). Execution. Em Lagrangian TRANSport model (LTRANS v.2) User's Guide (Cap. V, pp. 34-54). University of Maryland Center for Environmental Science, Horn Point Laboratory, Cambridge. Obtido de https://northweb.hpl.umces.edu/LTRANS/LTRANS-v2/LTRANSv2_UsersGuide_6Jan12.pdf.
- Scientific and Technical Advisory Panel (STAP): An independent group of scientists that advises the Global Environment Facility (2018). Plastic and the Circular Economy: A STAP document. Obtido em <https://www.thegef.org/sites/default/files/publications/PLASTICS%20for%20posting.pdf>.
- Shchepetkin, A. F., McWilliams, J. C. (2005). The Regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean Modelling. Elsevier. doi: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002. Obtido de http://falk.ucsd.edu/roms_class/shchepetkin04.pdf
- Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., & Swift, J. H. (2011). Mass Salt and Heat Budgets and Wind Forcing (Cap.5: p.142). Em L. D. Talley, G. L. Pickard, W. J. Emery, & J. H. Swift, Descriptive Physical Oceanography: An Introduction (6^o ed.). Elsevier.
- Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., & Swift, J. H. (2011). Dynamical Processes for Descriptive Ocean Circulation (Cap.7: p.197-199). Em L. D. Talley, G. L. Pickard, W. J. Emery, & J. H. Swift, Descriptive Physical Oceanography: An Introduction (6^o ed.). Elsevier.
- Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., & Swift, J. H. (2011). Atlantic Ocean (Cap.9: p.245). Em L. D. Talley, G. L. Pickard, W. J. Emery, & J. H. Swift, Descriptive Physical Oceanography: An Introduction (6^o ed.). Elsevier.
- Teles-Machado, Ana et al. (2015). Circulation on the Northwestern Iberian Margin: Vertical Structure and seasonality of the alongshore flows. Progress in Oceanography. doi: 10.1016/j.pocean.2015.05.021.
- Van Sebille, E., Griffies, S. M., Ryan, A., Adams, T. P., Berloff, P., Biastoch, A., & ... Zika, J. D. (24 de Novembro de 2017). Ocean Modelling. Lagrangian ocean analysis: Fundamentals and practices. doi: 10.1016/j.ocemod.2017.11.008.
- Van Sebille, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, B. D., Van Franeker, J. A., . . . Law, K. L. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. Environmental Research Letters. doi:10.1088/1748-9326/10/12/124006.
- Van Sebille, E., Aliani, S., Law, K. L., Maximenko, N., Alsina, J. M., Bagaev, A., ... Wichmann, D. (2020). The Physical Oceanography of the Transport of Floating Marine Debris. Environmental Research Letters. doi:10.1088/1748-9326/ab6d7d
- Wikibooks (2012). Mecânica dos fluidos/Equações básicas e utilizando as ferramentas matemáticas corretas. Acedido a 3 de outubro de 2019, em https://pt.wikibooks.org/wiki/Mecânica_dos_fluidos/Equações_básicas_e_utilizando_as_ferramentas_matemáticas_corretas.
- WikiROMS. (2015). Equations of Motions. Acedido a 14 de novembro de 2019, em https://www.myroms.org/wiki/Equations_of_Motion.